

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO Y MANEJO DE LAS AGUAS
RESIDUALES PRODUCTO DE LA EXPLOTACIÓN MINERA EN LA MINA DE
CARBON SAN FERNANDO, OPERADA POR CARBONES SAN FERNANDO
SAS, VEREDA PASO NIVEL, AMAGA-ANTIOQUIA**

ANTONY MUÑOZ OSPINO

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA DE MINAS
SOGAMOSO
2016**

**OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO Y MANEJO DE LAS AGUAS
RESIDUALES PRODUCTO DE LA EXPLOTACIÓN MINERA EN LA MINA DE
CARBON SAN FERNANDO, OPERADA POR CARBONES SAN FERNANDO
SAS, VEREDA PASO NIVEL, AMAGA-ANTIOQUIA**

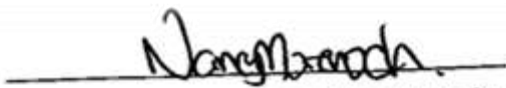
ANTONY MUÑOZ OSPINO

**Informe final de la práctica empresarial presentado como requisito para
optar al título:
INGENIERO DE MINAS**

**DIRECTOR
VICTOR HERNANDO MEDINA
ING. DE MINAS**

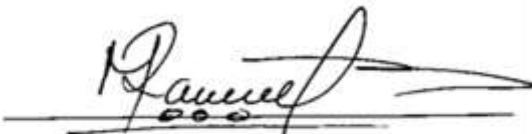
**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO
ESCUELA DE INGENIERIA DE MINAS
SOGAMOSO
2016**

NOTA DE ACEPTACIÓN



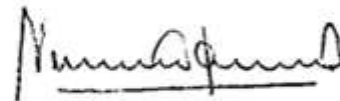
NANCY MORENO CHACÓN

Presidente del Jurado



SEGUNDO M. ROMERO BALAGUERA

Jurado



PASCUAL FONSECA PERALTA

Jurado



VICTOR H. MEDINA NIÑO

Director del proyecto de grado

Sogamoso, 09 de Septiembre de 2016

*A mis padres y lñas. por su sacrificio y constancia,
a Mayu por su apoyo y comprensión,
a J. Santiago por inspirarme.*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	12
INTRODUCCIÓN	13
CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL	14
1. GENERALIDADES	14
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	14
1.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y VÍAS DE ACCESO	14
1.3. RAZÓN SOCIAL DE LA EMPRESA	15
1.4. OBJETO SOCIAL	16
1.5. MISIÓN Y VISIÓN INSTITUCIONAL	16
1.5.1. Misión	16
1.5.2. Visión	16
1.6. POLÍTICA DE SOSTENIBILIDAD	16
1.7. ESTRUCTURA DE LA EMPRESA	17
1.8. DIRECCION, TELEFONOS Y FORMA DE CONTACTO	17
2. DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA	19
2.1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA	19
2.2. CARGO ASIGNADO	19
2.3. FUNCIONES ASIGNADAS	19
2.4. DESARROLLO DE LA PRACTICA	20
2.5. HORARIO	20
2.6. CAPACITACIONES	21
3. APORTES DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL	22
3.1. APORTES DE LA EMPRESA A LA FORMACION PROFESIONAL	22
3.2. APORTES DE LA PRÁCTICA A LA EMPRESA	23
CONCLUSIONES	24
RECOMENDACIONES	26
CAPITULO II. INFORME TÉCNICO DEL PROYECTO	27
1. GENERALIDADES	27
1.1. OBJETIVOS	27
1.2. LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO	27
1.3. GEOLOGÍA LOCAL	28
1.4. GEOMORFOLOGÍA	31
1.5. HIDROGEOLOGÍA	31
2. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DEL AGUA DE MINA	32
2.1. ANALISIS DE RESULTADOS	32
2.1.1. Significado del pH	32
2.1.2. Conductividad eléctrica (CE)	32
2.1.3. Sulfatos (Ión SO ₄)	32
2.1.4. Sales de Potasio (K)	32
2.1.5. Presencia de Calcio (CA) y Magnesio (Mg)	32

2.1.6. Metales y Metaloides	32
2.1.7. Solidos Suspendidos Totales (SST)	33
2.1.8. Hidrocarburos y otros parámetros de carácter general	34
2.1.9. Índice de Langelier	34
2.1.10. Corrosión	35
3. EVALUCION DEL SISTEMA DE BOMBEO EXISTENTE	36
3.1. METODOLOGÍA	36
3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO	36
3.2.1. Bombas	36
3.2.2. Motores	41
3.2.3. Tanques y depósitos de recolección	41
3.2.4. Tubería y accesorios	42
3.2.5. Caudales (Q)	43
3.3. ANALISIS DE LA INFORMACION	44
3.3.1. Equilibrio hidráulico del sistema	44
3.3.2. Carga estática total	44
3.3.3. Perdidas de energía en el sistema	45
3.3.4. Carga dinámica total	47
3.3.5. Eficiencia del sistema	47
3.3.6. Resumen Tabla 7. Resultados de la evaluación del sistema de bombeo en la mina de carbón San Fernando	50
3.3.7. Tiempos de operación y tiempos muertos	52
3.3.8. Procedimiento estándar de instalación, operación y mantenimiento	52
3.3.9. Reporte de fallas y averías	53
3.4. ANALISIS DE RESULTADOS	54
3.4.1. Motor	54
3.4.2. Tuberías	54
3.4.3. Bombas	55
3.4.4. Planeación	58
3.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INSTALADO	58
3.5.1. Costos por consumo de energía eléctrica	58
3.5.2. Costos de personal	58
3.5.3. Costos de mantenimiento	59
3.5.4. Costo total de operación y mantenimiento	59
3.6. RECOMENDACIONES GENERALES	59
4. OPTIMIZACION DEL SISTEMADE BOMBEO	62
4.1. ESTACIONES 1, 3	62
4.2. ESTACIONES 2, 4, 5, 9 Y 10	63
4.3. ESTACIONES 7 Y 8	70
4.4. DISTRUBUCION ESPACACIAL DEL SISTEMA PROPUESTO.	77
4.5. ANALISIS ECONOMICO DEL SISTEMA PROPUESTO.	77
4.5.1. Inversión inicial	77
4.5.2. Costos de consumo de energía	77
4.5.3. Costos de mantenimiento	77
4.5.4. Depreciación anual	78

4.5.5. Estado de resultados	78
4.5.6. Tasa Interna de Retorno (TIR)	78
5. SOLUCIÓN AL MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES	81
5.1. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PROPUESTA	82
5.2. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO	83
RECOMENDACIONES	105
CONCLUSIONES	106
BIBLIOGRAFIA	107
GLOSARIO	109
ANEXOS	111

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización geográfica.	15
Figura 2. Organigrama de la estructura general de la empresa.	18
Figura 3. Localización geográfica del área de concesión.	28
Figura 4. Instalaciones en superficie de la Mina de Carbón San Fernando.	30
Figura 5. Esquema del sistema de bombeo de la mina de carbón San Fernando.	37
Figura 6. Bomba de eje libre: Disposición del conjunto motor bomba.	38
Figura 7. Bomba monobloque: Disposición conjunto motor bomba y sus partes.	38
Figura 8. Dimensiones de los tanques sedimentadores.	42
Figura 9. Tubería y accesorios.	43
Figura 10. Altura de succión respecto al nivel del fluido en el depósito.	44
Figura 11. Curva característica de las estaciones de bombeo y su punto de operación.	57
Figura 12. Disposición del sistema propuesto para las estaciones 1 y 3.	65
Figura 13. Curva característica del sistema propuesto: Estación 1.	66
Figura 14. Curva característica del sistema propuesto: Estación 3.	67
Figura 15. Disposición del sistema propuesto para las estaciones 2, 4, 5, 9 y 10.	68
Figura 16. Curva característica sistema propuesto: Estaciones 2, 4, 5, 9 y 10.	69
Figura 17. Guía para la selección del tipo de bomba, basada en la velocidad específica.	71
Figura 18. Grafica de la velocidad específica para la selección preliminar de bombas, en relación con la eficiencia para distintos diámetros de impulsor.	71
Figura 19. Representación esquemática del sistema propuesto para el Tanque del Túnel San Joaquín.	73
Figura 20. Curva del sistema y curva característica de la bomba seleccionada.	76
Figura 21. Esquema general del sistema de tratamiento propuesto.	82
Figura 22. Esquema general para el dimensionamiento de la Canaleta Parshall.	84
Figura 23. Dimensiones de la canal con orificios en el fondo.	95

LISTA DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Datos comerciales de la empresa.	15
Cuadro 2. Datos de contacto de la empresa.	17
Cuadro 3. Aportes del practicante a la empresa.	23

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Resultado de los análisis de laboratorio de las aguas de mina.	35
Tabla 2. Información recolectada en visitas de campo. Marzo de 2015.	39
Tabla 3. Especificaciones técnicas de las bombas centrífugas usadas en la mina.	40
Tabla 4. Especificaciones técnicas del motor Standard Efficiency-IE1.	41
Tabla 5. Longitudes equivalentes a pérdidas locales (en metros de tubería de hierro fundido).	48
Tabla 6. Pérdidas de carga locales expresadas en metros de longitud equivalente de tubería.	49
Tabla 7. Resultados de la evaluación del sistema de bombeo de La Mina de Carbón San Fernando.	51
Tabla 8. Tiempo de trabajo del sistema de bombeo en cada estación.	52
Tabla 9. Fallas o averías reportadas durante los últimos tres meses.	53
Tabla 10. Problemas hidráulicos y mecánicos detectados en la operación de la bomba en cada estación.	56
Tabla 11. Costos por consumo de energía eléctrica.	58
Tabla 12. Costos de personal.	59
Tabla 13. Acciones recomendadas para corregir condiciones de operación ineficiente.	61
Tabla 14. Longitud equivalente para cálculo de pérdidas locales: nueva bomba.	73
Tabla 15. Materiales para la bomba.	74
Tabla 16. Exigencias técnicas de la bomba a cotizar.	75
Tabla 17. Resumen: cálculo de potencia consumida por el sistema propuesto.	76
Tabla 18. Costos de adquisición de la tubería.	79
Tabla 19. Costos de adquisición de accesorios.	79
Tabla 20. Costo de adquisición de la conjunto motor-bomba IHM D46-30X6 sobre estructura metálica más repuestos por un año.	79
Tabla 21. Costo de adquisición de motores eléctricos.	79
Tabla 22. Comparativo de los costos de energía entre el sistema actual y el sistema propuesto.	80
Tabla 23. Parámetros que exceden los Valores Limite Máximos Permisibles según Res. 0631 del 17 de Marzo de 2015.	81
Tabla 24. Determinación del ancho (W) de la Canaleta Parshall en función del caudal (Q).	84
Tabla 25. Valores de C y n para cada ancho (W).	85
Tabla 26. Dimensiones típicas de Medidores Parshall en cm.	85
Tabla 27. Requerimientos de sumergencia.	87
Tabla 28. Criterios de diseño para mezcladores rápidos.	89
Tabla 29. Resultados del cálculo de dimensionamiento del floculador.	92

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Mapa geológico del área de concesión	112
ANEXO 2. Ubicación estaciones de bombeo en plano topográfico de la mina	113
ANEXO 3. Medición de caudales	114
ANEXO 4. Cálculo de los tiempos de operación de los equipos de Bombeo	115
ANEXO 5. Bitácoras de mantenimiento del personal mecánico	116
ANEXO 6. Stock de mantenimiento del almacén	117
ANEXO 7. Manuales de instalación de bombas centrifugas	118
ANEXO 8. Reubicación de las estaciones de bombeo del sistema propuesto	173
ANEXO 9. Perdidas de carga en estaciones de bombeo	174
ANEXO 10. Cotización de la bomba seleccionada: Estaciones 7 y 8	179
ANEXO 11. Caracterización y estudio de tratabilidad de las aguas residuales	184
ANEXO 12. Planta de tratamiento propuesta	198

RESUMEN

El sistema de bombeo empleado en la Mina de Carbón San Fernando tiene algunas deficiencias relacionadas con el rendimiento de los equipos, especialmente de las bombas, las cuales, para algunos casos de diseño, no cumplen con la relación entre caudal y potencia requerida para la operación optima del sistema, por otro lado los problemas de fallas y averías son constantes, debidos principalmente, al rápido desgaste de sus componentes, sea el caso de elastómeros, sellos mecánicos y bujes, entre otros, juntas estas dos situaciones generan sobre costos de operación y en algunos casos llegan a afectar los avances en los frentes de producción debido a que no se cuenta con un plan de mantenimiento preventivo o plan de contingencia.

Para la optimización del sistema de bombeo de la mina, se determinaron, en primer lugar, las propiedades del fluido a transportar, ya que de ello depende el tipo de bomba que debe usarse y la selección de sus componentes, esto en relación con el diseño y materiales de fabricación, en segundo lugar, se diseñó un nuevo sistema de bombeo con base a los requerimientos y condiciones futuras de la mina a un término de cinco (5) años y algunas otras recomendaciones a corto plazo.

La actividad derivada del bombeo de las aguas de mina, en nuestro caso, es el vertimiento del fluido transportado en un afluente hídrico superficial, razón por la cual, se diseñó un plan de manejo ambiental para la disposición final de las mismas.

Como resultado se obtuvo un ahorro significativo en los costos de operación, se elaboró el procedimiento estándar de instalación y operación, junto con un plan de mantenimiento preventivo.

PALABRAS CLAVE: Sistema de Bombeo, Eficiencia en equipos de bombeo, Calidad del Agua, Planta de Tratamiento, Filtración rápida, Floculación, Sedimentación, Vertimiento Puntual, Costos en sistemas de bombeo.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de bombeo son usados en la industria minera subterránea cuando se encuentran infiltraciones de agua al interior de la mina producto de las excavaciones realizadas para el desarrollo de esta actividad, aguas que deben ser llevadas hasta superficie para garantizar la continuidad de la producción.

La elección de un sistema de bombeo adecuado se logra con el establecimiento del equilibrio hidráulico del sistema, para llegar a él se aplican las ecuaciones de conservación de la masa, equilibrio de energía y cantidad de movimiento, la importancia de ello radica en que pueden cometerse errores como el sobredimensionamiento del sistema lo cual se traduce en menores eficiencias y por tanto en pérdidas económicas y técnicas, en un caso contrario se tendría un sistema limitado, incapaz de evacuar el agua requerida.

En segundo lugar y no menos importante la adecuación de espacios destinados a la captación y manejo de las aguas mineras amerita especial cuidado por cuanto debe considerarse el vertimiento de dichas aguas a afluentes hídricos luego de haber sido llevadas hasta superficie, este problema incluye el análisis de las aguas de mina, el tratamiento de las mismas y el diseño de tanques de sedimentación, esto como parte de las obligaciones minero ambientales adquiridas por los responsables de las explotaciones mineras, denominados titulares mineros.

El no cumplimiento de estas obligaciones pueden acarrear multas y sanciones de carácter económico y las faltas repetitivas puede ser causantes de la revocatoria de la licencia ambiental, indispensable para el desarrollo de las actividades mineras.

Por estas circunstancias el presente proyecto tiene como finalidad optimizar el sistema de bombeo de la **Mina de Carbón San Fernando** operada por la empresa **Carbones San Fernando SAS** ubicada en Amagá, Antioquia, logrando una mayor eficiencia y por ende afectar positivamente la productividad en la mina, además plantea darle un manejo adecuado a las aguas de mina para que su vertimiento en la Quebrada Peñitas se realice dentro de los parámetros ambientales establecidos por la legislación colombiana.

CAPITULO I. CARACTERÍSTICAS DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL

1. GENERALIDADES

1.1. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

CARBONES SAN FERNANDO S.A.S. Es una compañía del sector minero con domicilio en la Vereda Paso Nivel del Municipio de Amaga, Departamento de Antioquia; con más de 40 años de experiencia en explotación minera.

Actualmente la empresa Carbones San Fernando S.A.S. cuenta con el contrato de concesión para la explotación minera No. 11338, en un área de 483 Ha, con 25 millones de toneladas de reservas de carbón probadas. Cuenta con 523 trabajadores para el desarrollo administrativo y operativo de su actividad.

La empresa se divide principalmente en dos áreas: Administrativa y de operaciones. En el área operaciones la compañía cuenta con una mina en explotación: Mina San Joaquín. Las Minas Apique 3 y La Selva se encuentran en labores de mantenimiento y hacen parte del circuito de ventilación de la Mina San Joaquín y a su vez son utilizadas como vías alternas de evacuación.

1.2. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA Y VÍAS DE ACCESO

La empresa Carbones San Fernando SAS se encuentra ubicada en la Vereda Paso Nivel, del Municipio de Amaga, al suroeste del Municipio de Medellín, Departamento de Antioquía.

En cuanto a sus vías de acceso, la principal vía es la pavimentada que de Medellín conduce a Amaga, tomando el desvío en su kilómetro 33 conduciendo por vía carreteable aproximadamente 500 metros hasta sus instalaciones, ésta es una zona con flujo de vehículos pesados con poco tránsito de personal a excepción el que labora en la mina y zonas aledañas.

Figura 1. Localización geográfica.



Fuente: Google Earth.

1.3. RAZÓN SOCIAL DE LA EMPRESA

En la siguiente tabla se relacionan la razón social de la empresa, NIT y representación legal de la misma, entre otros datos comerciales:

Cuadro 1. Datos comerciales de la empresa.

RAZÓN SOCIAL	CARBONES SAN FERNANDO S.A.S.
NIT	890.903.357-9
ACTIVIDAD ECONÓMICA	Explotación de Carbón Bajo Tierra.
REPRESENTANTE LEGAL	Sonia Sabogal Montenegro.
CEDULA DE CIUDADANIA	66.756.731 de Palmira, Valle.
CÓDIGO ACTIVIDAD ECONÓMICA	5110010
CLASE DE RIESGO	5

Fuente: Datos del estudio.

1.4.OBJETO SOCIAL

Carbones San Fernando SAS fue constituida por escritura pública No. 8500 del 20 de Diciembre de 1961 en la ciudad de Medellín, tiene como objeto social las siguientes actividades:

1. Exploración, explotación, comercialización y transporte de carbón.
2. La fabricación, distribución, importación, exportación, comercialización, compra y venta de toda clase de materiales e insumos para minería.
3. La importación, exportación, compra y venta de insumos para minería y el abastecimiento del mercado interno de dichos insumos.
4. La representación de casas comerciales nacionales o extranjeras productoras o distribuidoras de materiales o insumos para minería.

1.5.MISIÓN Y VISIÓN INSTITUCIONAL

1.5.1. Misión. Somos una compañía dedicada a la explotación y comercialización de carbón mineral térmico, que cumpliendo con toda la normatividad legal, operamos con altos estándares de seguridad, buscando atender de manera oportuna y confiable los requerimientos de nuestros clientes en los mercados nacionales e internacionales, lo que nos hace un aliado competitivo en su gestión de sistemas energéticos.

1.5.2. Visión. Ser protagonistas de primer orden en la explotación minera y la gestión de sistemas energéticos basados en carbón mineral térmico, aportando de manera innovadora y competitiva al crecimiento económico de nuestros clientes.

1.6.POLÍTICA DE SOSTENIBILIDAD

Carbones San Fernando S.A.S. se compromete con la salud y Seguridad de nuestra gente, siendo una prioridad organizacional, trabajando por el bienestar ocupacional, minimizando los riesgos inherentes a las operaciones y destinando los recursos necesarios para el cumplimiento.

La protección al Medio Ambiente hace parte de nuestro que hacer operacional, evaluando constantemente los posibles impactos ambientales para su prevención. Practicamos la buena vecindad y prevenimos el daño a la propiedad.

Promovemos el desarrollo integral del mismo y las buenas relaciones centradas en el beneficio mutuo.

Vivimos por la excelencia en nuestras operaciones, ofreciendo e innovando en productos y servicios de clase mundial, cumpliendo con el más alto estándar de calidad.

Entregamos a nuestros clientes, información clara, oportuna y veraz. Así mismo, estamos en un proceso de mejora continua en cada uno de nuestros procesos, lo que nos permite generar valores institucionales.

Damos estricto cumplimiento a la legislación actual vigente y presentamos información transparente en todo momento y de acuerdo a sus requerimientos.

1.7. ESTRUCTURA DE LA EMPRESA

La empresa se divide principalmente en dos áreas, la Administrativa y la de operaciones, las cuales, a su vez, se subdividen en departamentos y por último en secciones, su estructura es piramidal. En su cabeza La Junta Directiva, en un nivel medio la Gerencia y por último las distintas jefaturas y sus dependencias.

La estructura organizacional de la empresa puede observarse con claridad en la Figura 2. Organigrama de la estructura general de la empresa.

1.8. DIRECCION, TELEFONOS Y FORMA DE CONTACTO

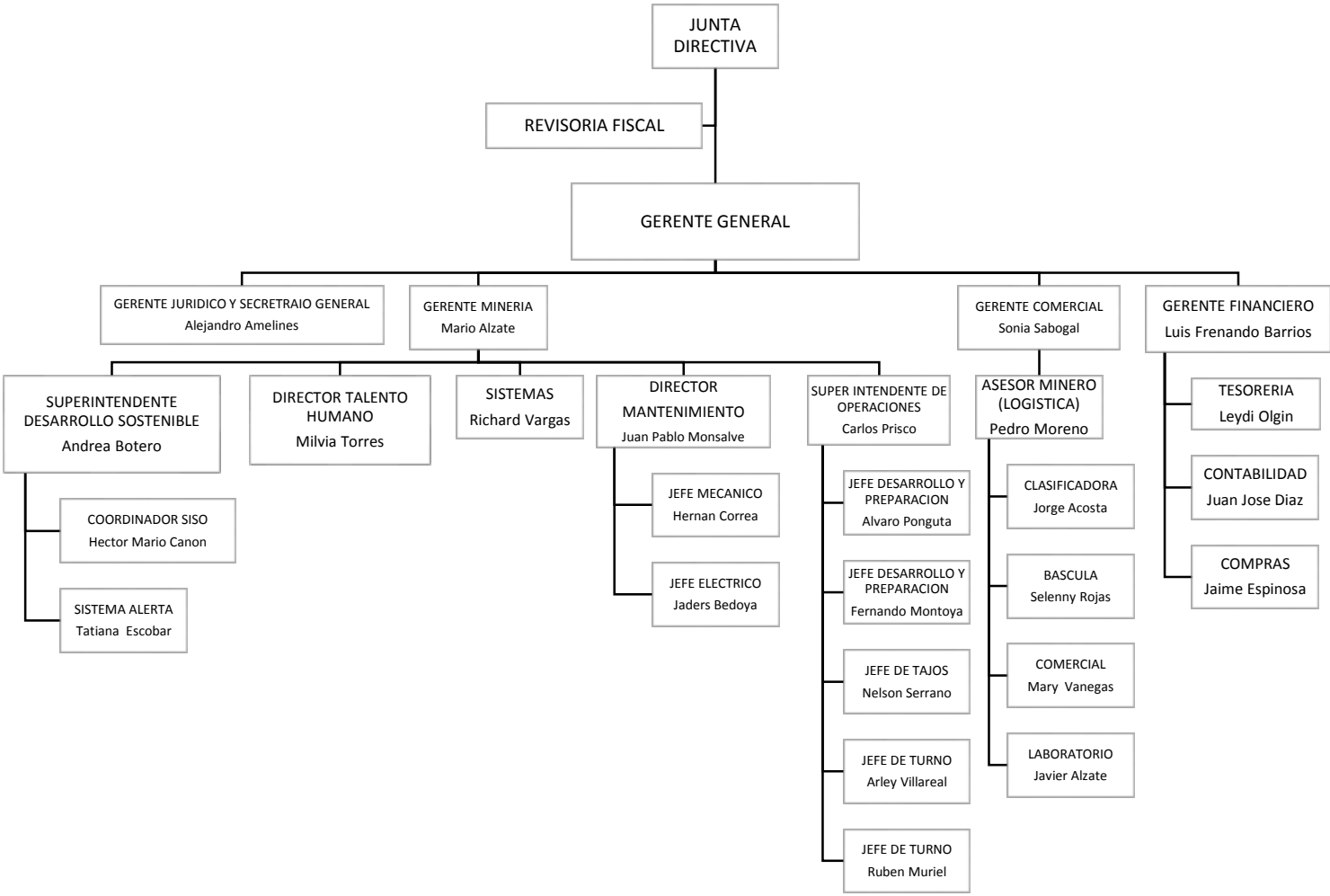
La dirección, teléfonos y demás datos de contacto son los que se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Datos de contacto de la empresa.

DIRECCIÓN	Vereda Paso Nivel, Amagá – Antioquia
TELÉFONOS	57+4-8473186 57+4-8471575
FAX	094-8473712
E-MAIL	gerencia@csfdo.com

Fuente: Datos del estudio.

Figura 2. Organigrama de la estructura general de la empresa.



Fuente: Datos del estudio.

2. DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA

2.1. OBJETIVOS DE LA PRÁCTICA

Esta práctica se realiza con los siguientes objetivos:

- ✓ Aplicar los conocimientos teóricos y técnicos adquiridos a lo largo de la carrera como criterio para la toma de decisiones.
- ✓ Conocer la estructura general de una empresa y el papel que cumple el Ingeniero de Minas dentro de ella en cada una de las etapas de su proceso productivo.
- ✓ Desarrollar habilidades y competencias, que desde la práctica, permitan relacionarse estrechamente con el mercado laboral.
- ✓ Adquirir nuevos conocimientos como complemento de la formación profesional.
- ✓ Desarrollar un proyecto como contraprestación a la empresa contratante.

2.2. CARGO ASIGNADO

Ingeniero de minas asistente del área de operaciones y producción.

2.3. FUNCIONES ASIGNADAS

Las funciones asignadas a los ingenieros de minas a cargo del departamento de operaciones mineras son:

- ✓ Planear las tareas a realizar en cada turno.
- ✓ Control del suministro de insumos y servicios a la mina (Electricidad, ventilación, desagüe, sostenimiento)
- ✓ Manejo de tiempos de personal (ausentismo, permisos, licencias, vacaciones)
- ✓ Manejo de nómina del personal.
- ✓ Seguimiento y control de las labores de desarrollo, preparación y explotación.
- ✓ Inspección técnica de los frentes de avance.
- ✓ Inspección de seguridad en los frentes.
- ✓ Dirección de trabajos especiales (ensanches, recuperación de vías, pozos, etc.)
- ✓ Formular proyectos de mejoramiento continuo dentro de las líneas que se indiquen en el grupo de trabajo.

Como ingeniero de minas asistente en el área de operaciones, las responsabilidades se limitan a:

- ✓ El estricto cumplimiento de las normas y estándares de seguridad y calidad acogidos por la empresa.
- ✓ La inspección, supervisión, seguimiento y control de labores o procesos específicos.
- ✓ Dirección de trabajos menores.
- ✓ Formulación de proyectos de mejoramiento según lo prevea el grupo de trabajo.

2.4. DESARROLLO DE LA PRACTICA

La práctica se divide en tres etapas:

- 1) **Etapla de Inducción.** Esta abarca la primera semana en el desarrollo de la práctica y está diseñada para brindar orientación acerca de las generalidades de la empresa, presentación al equipo de trabajo, reconocimiento de las instalaciones, políticas empresariales de calidad, desarrollo sostenible y seguridad.
- 2) **Etapla de rotación.** Luego de superar la etapa de inducción, el practicante rota por todas las áreas del departamento asignado, para este caso tenemos: labores de desarrollo, preparación y tajos; todo bajo la orientación y acompañamiento del jefe de área.
- 3) **Etapla productiva.** Se desarrolla en el último mes del contrato de aprendizaje y consiste en realizar actividades específicas según lo requiera el Superintendente de Operaciones y se desarrolla bajo la supervisión del Jefe de Turno.

Los límites de cada etapa en relación con sus tiempos pueden variar según lo disponga el Superintendente. El desarrollo de las funciones asignadas se da en las etapas dos y tres, dado que para este caso, el presente proyecto se formula y desarrolla durante la etapa de rotación, sumado a esto se desarrollan otras actividades complementarias de supervisión y dirección de labores menores.

2.5. HORARIO

Para las dos primeras etapas el horario establecido tiene lugar en el primer turno del día que va de 6 am a 2 pm, donde se cuenta con el acompañamiento de los jefes de área, para la tercera etapa se rota semanalmente entre los turnos de tarde y noche (amanecida) que van de 2 pm a 10 pm y de 10 pm a 6 am, respectivamente, aquí el acompañamiento es del Jefe de Turno; se labora de lunes a sábado, completando las 48 horas semanales establecidas por contrato de aprendizaje.

2.6. CAPACITACIONES

Nombre: Presentación General de la Compañía.

Responsable: Dr. Javier Ríos

Nombre: Política de Seguridad.
 Política de Alcoholemia.
 Plan de Emergencias.
 Plan y Rutas de Evacuación.
 Elementos de Protección Personal.
 Reporte e investigación de accidentes.
 Sistema de Monitoreo continuo.
 Sistemas de Comunicación.
 Límites permisibles de los gases y protocolos.
 Uso del autorescatador.
 Sistema de Ventilación.
 Sistema ALERTA.

Responsable: Dra. Briyith Tatiana Escobar

Nombre: Procedimiento Estándar para tareas en el frente de explotación.

Responsable: Ing. Andrea Botero Fernández

Nombre: Iniciación y ciclo de tajos.
 Informe de producción por canales, insumos y ausentismo.
 Programación de tajos.
 Inspección en tajos.

Responsable: Ing. Nelson Serrano.

3. APORTES DE LA PRÁCTICA EMPRESARIAL

3.1. APORTES DE LA EMPRESA A LA FORMACION PROFESIONAL

La empresa aporta conocimientos técnicos complementarios a la formación académica del estudiante, abordando temas organizacionales y otros inherentes a la explotación minera como tal. Los temas principales fueron:

- Funcionamiento y estructura organizacional.
- Labores de desarrollo, preparación y explotación.
- Ciclos de producción.
- Labores especiales.
- Seguridad en el trabajo.
- Procedimiento estándar de operación.
- Organización del personal en los frentes de trabajo.
- Servicios mineros e insumos.
- Inspección y supervisión de labores mineras.
- Control de calidad de la producción.
- Clasificación por tamaños del carbón.

Estos temas son desarrollados mediante un modelo teórico-práctico, donde se realizan:

- Capacitaciones y tutorías.
- Observación directa de las operaciones con acompañamiento y orientación profesional.
- Asignación de funciones que permitan poner en práctica los conocimientos adquiridos.

Adicionalmente, se realizaron actividades complementarias que promueven el liderazgo, la confianza, la hermandad y el trabajo en equipo, a través de charlas dirigidas y actividades deportivas.

Así pues las habilidades y competencias adquiridas son:

- ✓ Desarrollo de trabajos en equipo.
- ✓ Coordinación de actividades.
- ✓ Manejo de personal.
- ✓ Criterio para la toma de decisiones.
- ✓ Supervisión e inspección de operaciones.
- ✓ Control y seguimiento de labores mineras.
- ✓ Formulación y ejecución de micro-proyectos.

Entre otros aportes, Carbones San Fernando SAS brinda apoyo técnico y económico para el desarrollo de la práctica empresarial.

3.2. APORTES DE LA PRÁCTICA A LA EMPRESA

Los aportes del practicante a la empresa se relacionan con la actividad y los logros obtenidos de su desarrollo, en el siguiente cuadro:

Cuadro 3. Aportes del practicante a la empresa.

ACTIVIDAD	APORTE	LOGRO
Seguimiento y control de la calidad del carbón.	Informe técnico y propuesta de mejora.	Identificación de los factores de contaminación del carbón.
Formulación del proyecto de optimización del sistema de bombeo y manejo de aguas residuales.	Informe técnico y propuesta de mejora.	Evaluación técnica y económica del sistema de bombeo.

Fuente: El autor.

CONCLUSIONES

En la práctica empresarial se usaron como base los conocimientos técnicos y teóricos obtenidos previamente por el practicante, al aplicar, en primer lugar, el método científico de la investigación, y en segundo, conceptos ingenieriles a un caso práctico, logrando la identificación de un problema y planteando una alternativa de solución.

El papel del ingeniero de minas en el desarrollo de las actividades mineras es fundamentalmente administrativo y abarca tres áreas principales: de operaciones, planeamiento y seguridad.

Dentro de sus funciones principales están las siguientes:

- ✓ Planear las tareas a realizar en cada turno.
- ✓ Control del suministro de insumos y servicios a la mina (Electricidad, ventilación, desagüe, sostenimiento)
- ✓ Manejo de tiempos de personal (ausentismo, permisos, licencias, vacaciones)
- ✓ Manejo de nómina del personal.
- ✓ Seguimiento y control de las labores de desarrollo, preparación y explotación.
- ✓ Inspección técnica de los frentes de avance.
- ✓ Inspección de seguridad en los frentes.
- ✓ Dirección de trabajos especiales (ensanches, recuperación de vías, pozos, etc.)
- ✓ Formular proyectos de mejoramiento continuo dentro de las líneas que se indiquen en el grupo de trabajo.

Aunque se dice que la experiencia adquirida en el desarrollo de una práctica empresarial no cuenta como experiencia laboral, sin duda ésta ofrece herramientas, habilidades y competencias, que permiten competir en el mercado laboral. Algunas de ellas son:

- ✓ Desarrollo de trabajos en equipo.
- ✓ Coordinación de actividades.
- ✓ Manejo de personal.
- ✓ Criterio para la toma de decisiones.
- ✓ Supervisión e inspección de operaciones.
- ✓ Control y seguimiento de labores mineras.
- ✓ Formulación y ejecución de micro-proyectos.

Los conocimientos adquiridos se enfocan principalmente en las operaciones de producción, la administración de suministros y equipos y el sistema de gestión de seguridad.

A pesar de sus limitaciones, se desarrolló el proyecto titulado: OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO Y MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES PRODUCTO DE LA EXPLOTACIÓN MINERA EN LA MINA DE CARBON SAN FERNANDO, OPERADA POR CARBONES SAN FERNANDO SAS, VEREDA PASO NIVEL, AMAGA-ANTIOQUIA.

RECOMENDACIONES

1. Establecer un cronograma de actividades que especifique, entre otras cosas, cargo, funciones, área, tutor responsable y los logros esperados con el desarrollo de cada actividad, incluyendo indispensablemente los tiempos en que podrá desarrollarse la propuesta y el proyecto de grado.
De esta manera podrá medirse el progreso del practicante y aprovechar de mejor manera su talento humano en pro de su formación integral y los intereses particulares de la empresa.
2. Incluir dentro del presupuesto de cada área o jefatura, los recursos suficientes para garantizar el desarrollo de los proyectos o tesis de grado, además de la logística y el acompañamiento del coordinador de la práctica.

CAPITULO II. INFORME TÉCNICO DEL PROYECTO

1. GENERALIDADES

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. General. Optimizar el sistema de bombeo y proponer una solución al manejo de las aguas residuales de la mina de Carbón San Fernando, Amagá-Antioquia.

1.1.2. Específicos.

- ✓ Evaluar técnica y económicamente el sistema de bombeo existente.
- ✓ Rediseñar el sistema de bombeo existente.
- ✓ Evaluar la viabilidad económica del diseño propuesto.
- ✓ Proponer una solución para el manejo de las aguas residuales.

1.2.LOCALIZACIÓN ÁREA DE ESTUDIO

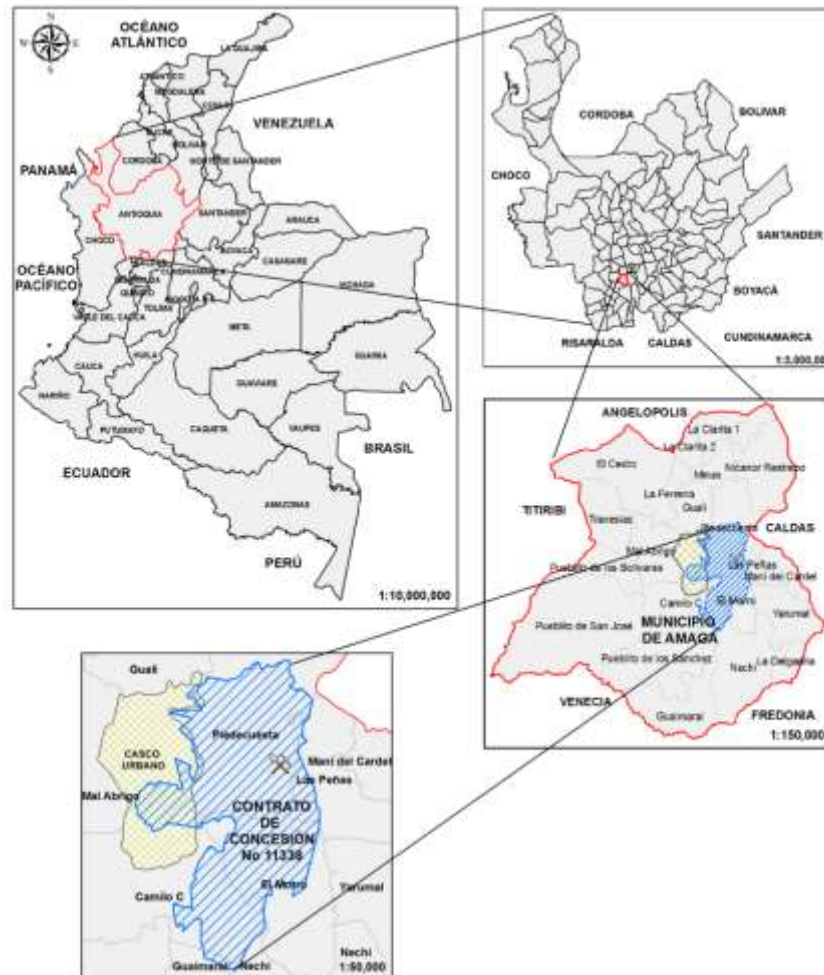
El área e estudio se encuentra enmarcada por el Contrato Único de Concesión No. 11338 concedido para la explotación de carbón térmico, con una extensión de 483 Hectáreas, con 25 millones de toneladas de reservas de carbón probadas.

Geográficamente, el área en concesión se encuentra ubicada en la Vereda Paso Nivel, del Municipio de Amaga, al suroeste del Municipio de Medellín, Departamento de Antioquía (Ver Figura 3).

Geológicamente pertenece a la Cuenca del Sinifaná y la explotación se desarrolla sobre la Formación Amagá.

En cuanto a sus vías de acceso, la principal vía es la pavimentada que de Medellín conduce a Amaga, tomando el desvío en su kilómetro 33 conduciendo por vía carreteable aproximadamente 500 metros hasta sus instalaciones, ésta es una zona con flujo de vehículos pesados con poco tránsito de personal a excepción el que labora en la mina y zonas aledañas.

Figura 3. Localización geográfica del área de concesión.



Fuente: El Autor.

1.3. GEOLOGÍA LOCAL

En el área de estudio se encuentran formaciones de edad mesozoica y cenozoica de tipo ígneo y sedimentario, descritas de la más antigua a la más reciente de la siguiente manera:

STOCK DE AMAGÁ (TRga). También denominado Plutón de Amaga, tiene 11,7 Km de longitud y una amplitud máxima de 3 Km, está constituido por una roca dominante maciza, granular a porfídica, de grano medio a grueso, de color moteado rosado a gris claro, con biotita negra. La composición es granítica aunque varía de cuarzomonzonita a granodiorita. Su edad es del Triásico Medio. Su contacto con la Formación Amagá es fallado.

El estado avanzado de meteorización en que se encuentra esta unidad ha favorecido la explotación de arenas utilizadas principalmente en la industria de la construcción.

Esta unidad se encuentra al oriente de la zona de estudio, en las veredas Maní del Cardal y Yarumal.

DIORITA DE PUEBLITO (Kdp). Este cuerpo aflora hacia el extremo occidental del casco urbano de Amagá, es de composición predominantemente diorítica, aunque se presentan variaciones textuales y composicionales en forma de bandas centimétricas de granodiorita, pegmatitas hornbléndicas y masas irregulares de cuarzo. Se encuentra delimitada por la Falla Amagá encontrándose bastante diaclasado y triturado. Su edad es cretácica y pertenece al complejo ofiolítico del Cauca.

FORMACIÓN AMAGÁ. Está constituida por sedimentos continentales y lacustres y que actualmente se encuentran conservados en estructuras de plegamiento como sinclinales. Su edad es terciaria. Según sus características litológicas, presencia de mantos de carbón y posición estratigráfica ha sido dividida en tres miembros.

Miembro inferior (Pgai). Consta de conglomerados, areniscas cuarzosas, lodolitas carbonosas y mantos delgados de carbón con espesores inferiores a 70 cm. Tiene un espesor promedio de 205m.

Miembro medio (Pgam). Tiene un espesor aproximado de 350m, es en éste donde se encuentran los mantos de carbón económicamente explotables con espesores de 1,20 a 2,0 m. Este miembro se distingue por la ausencia de conglomerados, por tener mayor espesor las capas de lodolitas y arcillolitas carbonosas y por encontrarse concreciones arenosas con matriz siderítica.

En Amagá los mantos de carbón son del tipo sub bituminosos y llegan a tener espesores hasta de 4 metros. Esta unidad geológica es la unidad geológica con mayor grado de explotación, ya que sobre ella se ha desarrollado las explotaciones subterráneas de los mantos de carbón, también se ha desarrollado las explotaciones de mantos de arcillas para la fabricación de ladrillos, tejas y cerámicas.

Miembro superior (Ngas). Con un espesor de 1000m, se caracteriza por la ausencia de mantos de carbón explotables e igualmente de conglomerados y por el predominio de areniscas de color oscuro y arcillolitas de color ocre hacia el techo.

En la zona de estudio solo afloran el miembro medio y superior debido al cabalgamiento del Stock de Amaga sobre el miembro inferior de la Formación Amaga a través de la Falla Piedecuesta.

Figura 4. Instalaciones en superficie de la Mina de Carbón San Fernando.



Fuente: Carbones San Fernando SAS

ALUVIONES RECIENTES (Qar). Son depósitos no consolidados formados a partir de las aguas corrientes superficiales, bien sean las encausadas o las que discurren libremente. Las formas aluviales más comunes son los lechos de inundación y llanuras aluviales.

Estructuralmente, el área se encuentra enmarcada por el Sistema de Fallas Cauca Romeral, de dirección predominante norte-sur, y al cual pertenecen la Falla Piedecuesta al este y Amagá al oeste. Estas fallas se han considerado de tipo inverso y de origen compresional.

La Fallas ocasionan trituramiento intenso de las rocas masivas, presencia de sistemas de diaclasas y fracturas, tramos rectos de cauces y contrastes abruptos del relieve.

En medio de las fallas principales se presenta una estructura de tipo sinclinal afectando las rocas de la Formación Amagá denominada Sinclinal de Amagá, al occidente del polígono de concesión.

La geología local del área de estudio puede verse en el Anexo 1.

1.4. GEOMORFOLOGÍA

La zona de estudio se encuentra ubicada geomorfológicamente dentro de la gran Unidad de Relieve conocida como Cañón del río Cauca–San Juan, y más específicamente en las unidades morfogénicas de tipo *Vertientes Larga de Fuerte Inclinación y Filos de Topes Subredondeados Estrechos*, ubicadas en altitudes entre los 1200 y 2200 m.s.n.m. asociadas al sistema de fallas Romeral.

Presenta una forma general plana a convexa, con pendientes mayores a 7 grados y cercanas a los 50 grados, generando un sistema de filos con tope estrecho y flancos planos a convexos y valles de sección transversal en forma de “V”.

1.5. HIDROGEOLOGÍA

El área de estudio se encuentra en inmediaciones de la microcuenca de la Quebrada Yarumal la cual comprende un área de 549,95 Ha, dicha quebrada nace en las veredas Yarumal y Nechí a 2.000 msnm, y vierte sus aguas al río Amagá a una altitud de 1.350 msnm cerca al área urbana, pasa muy cerca de la bocamina donde es encauzada para evitar su desbordamiento y posible afectación a las labores mineras.

La microcuenca presenta una temperatura entre 18 y 23 °C, una humedad relativa entre 70 y 80% y una precipitación superior a los 2000 mm/año, siendo los meses de Agosto a Enero y de Abril a Junio los de mayor precipitación y los de menor precipitación, los meses de Febrero, Marzo y Julio.

Tiene una pendiente promedio de 25 al 50%, la vegetación predominante son cultivos de café y áreas con vegetación natural, rastrojos altos y bajos, los suelos pertenecen a la asociación Amaga y Yarumal caracterizados por ser suelos moderadamente profundos a profundos, limitados por factores físicos (piedras o gravillas en el perfil), bien drenados, desarrollados a partir de rocas ígneas y depósitos de cenizas volcánicas, susceptibilidad a la erosión de moderada a alta.

2. CARACTERIZACION FISICOQUIMICA DEL AGUA DE MINA

Los datos tomados para la caracterización fisicoquímica de las aguas residuales de la mina, corresponden al proyecto titulado BIOTECNOLOGÍA Y NANOTECNOLOGÍA PARA LA DESCONTAMINACIÓN DE AGUAS Y SUELOS RESIDUALES DE MINERÍA. HACIA UNA MINERÍA SOSTENIBLE Y RESPONSABLE, realizado por el SEMILLERO DE INVESTIGACION EN BIOTECNOLOGIA DEL SENA, LA SALADA (CALDAS) y son los que se muestran en la Tabla 1.

2.1. ANALISIS DE RESULTADOS

El análisis se realizó para cada parámetro comparando los resultados obtenidos con la Res. 0631 del 17 de Marzo de 2015 por la cual se establecen los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público, además de evaluar la posible incidencia de estos en los procesos de corrosión y abrasión en tuberías y equipos de bombeo.

2.1.1. Significado del pH. Este parámetro determina con relativa confiabilidad la tendencia alcalina o acida del agua, más no se constituye en una medida de la cantidad de acidez o alcalinidad en la muestra, como puede apreciarse en la Tabla 1, el pH de todas las muestras es mayor a 7, por lo cual podemos decir que son aguas ligeramente alcalinas. La medida del pH es una importante consideración en la determinación de la acción corrosiva del agua, a mayor acidez mayor corrosión, pero al ser estas aguas ligeramente alcalinas, entonces son a su vez “no corrosivas”, condición que se puede corroborar con los bajos valores reportados para la acidez en contraste con los altos valores reportados para la alcalinidad del agua.

2.1.2. Conductividad eléctrica (CE). La CE se define como la capacidad de una sustancia de conducir la corriente eléctrica, en el caso del agua este parámetro depende del contenido de sales que puede tener la muestra y a su vez, permite determinar indirectamente y de manera aproximada los SDT que contiene.

Esta medida es muy útil, debido a que, conociendo los SDT puede hallarse la dureza del agua.

Para nuestro caso tenemos que, aunque sean un poco altos, los valores de la CE no son causantes de corrosión.

2.1.3. Sulfatos (ión SO_4). Es un aspecto muy importante a considerar cuando las aguas son destinadas al consumo humano, siendo nocivo encontrarlos en altas concentraciones. No obstante, para nuestro caso tenemos bajas concentraciones de este ión.

2.1.4. Sales de potasio (K). Las rocas de potasio, así como los silicatos, son más solubles en agua que las formadas por sodio, en general se encuentran en bajas cantidades y no representa problemas corrosivos.

2.1.5. Presencia de calcio (Ca) y magnesio (Mg). Las sales de Ca y Mg son los componentes primarios de la dureza en las aguas, las cuales pueden causar escamaciones en las tuberías que efectivamente se presentan en la mina pero a un nivel superficial.

2.1.6. Metales y metaloides. Por lo general la presencia de metales pesados y metaloides en el agua se estudia desde el punto de vista de la potabilización del agua y por ende de los efectos nocivos que pueden tener estos para la salud y la biota en general, razón por la cual, es importante restringir su presencia en las fuentes de agua por encima de los valores límite máximos permisibles (VLMP) para cada caso.

Por otro lado a lo largo de la red de bombeo pueden presentarse, bajo condiciones especiales, precipitados de alguno de estos elementos causando obstrucción en tuberías o una posible acumulación de los mismos en la voluta de las bombas, entre otros efectos adversos al sistema pueden favorecer los procesos de corrosión y abrasión.

Como puede verse en la Tabla 1 el cobre (Cu) presenta variaciones importantes de una muestra a otra arrojando una concentración promedio de 2,1 mg/L y resulta ser el único metal que excede el VLMP establecido para éste en el Art. 10 de la Res. 0631 del 17 de Marzo de 2015.

Metales y metaloides como el Arsénico, Cadmio, Mercurio, Níquel, Plata y Plomo se reportan como no detectables.

2.1.7. Sólidos suspendidos totales (SST). Los sólidos suspendidos totales son definidos como el residuo no filtrable de una muestra de agua. La naturaleza del material en suspensión es muy variable, así mismo sus tamaños que pueden ser del orden de las arcillas o de los coloides, no obstante su principal característica es su peso específico igual o inferior al del agua razón por la cual no se sedimentan naturalmente.

Este parámetro es muy importante dado que se asume que la presencia de sólidos en suspensión en gran cantidad causan abrasión al entrar en contacto con los metales dada la fricción generada entre estos, sin embargo, el problema real

aparece cuando los tamaños de dichos sólidos son relativamente muy grandes, debiendo considerar la elección adecuada del material constructivo para los impulsores, sellos, etc.

Por otro lado los sólidos en suspensión afectan el color y el sabor del agua y se relacionan con la turbiedad de la misma, razón por la cual se restringe el grado de concentración de estos en las aguas destinadas para el consumo humano. Para el caso de vertimientos en afluentes hídricos superficiales una alta turbiedad limita la penetración de los rayos solares afectando negativamente a diversas especies acuáticas.

Para este caso, la concentración de los SST sobrepasa el VLMP y además se pueden considerar que el agua es moderadamente abrasiva.

2.1.8. Hidrocarburos y otros parámetros de carácter general. Se conoce como DBO a la demanda Bioquímica de Oxígeno y se define como la cantidad de oxígeno que requieren los microorganismos para oxidar (estabilizar) la materia orgánica biodegradable en condiciones aeróbicas y para este caso sobrepasan el VLMP.

Otros parámetros exigidos por las autoridades ambientales para análisis y reporte como Grasas, Aceites, Fenoles, Hidrocarburos, Cianuro y Nitrógeno se reportan como no detectables.

2.1.9. Índice de Langelier Se define como la diferencia entre el pH real (o medido) de una agua y el pH hipotético si el agua estuviera en equilibrio con CaCO_3 .

$$IL = pH_a - pH_s$$

Donde:

pH_a = pH real del agua.

pH_s = pH del agua en equilibrio con CaCO_3 .

En general si $IL=0$ el agua está en equilibrio con CaCO_3 suficiente; si $IL>0$, el agua está sobresaturada con CaCO_3 y tiende a depositar precipitados de CaCO_3 en el interior de los tubos, reduciendo su capacidad de transporte, es decir que estas aguas tienden a ser “*incrustantes*” (caso de Carbones San Fernando); si $IL<0$, el agua está subsaturada respecto al CaCO_3 y se les clasifica como corrosivas.

Tabla 1. Resultado de los análisis de laboratorio de las aguas de mina.

		No. MUESTRA					
		1	2	3	4	5	6
PARAMETROS DE MEDICIÓN	pH	8.26	8.20	8.05	8.07	8.42	7.83
	Conductividad $\mu\text{s}/\text{cm}$	2780.00	3385.00	3446.67	1529.00	4780.00	4840.00
	Acidez mg/L	18.00	30.00	32.67	0.00	0.00	0.00
	Alcalinidad mg/L	1240.00	1142.00	971.33	684.00	870.67	981.60
	Fe mg/L	1.60	1.30	1.20	0.70	0.70	0.84
	Cu mg/L	8.60	1.20	2.00	0.30	0.20	0.25
	Zn mg/L	0.08	0.20	0.19	0.05	0.01	0.30
	Mn mg/L	4.94	1.93	1.43	0.46	0.50	1.01
	Mg mg/L	19.80	122.50	21.63	4.45	5.00	5.00
	Ca mg/L	14.00	9.45	8.33	45.50	81.00	31.00
	K mg/L	15.70	22.75	19.73	25.80	5.00	6.00
	P mg/l	0.82	0.59	0.42	0.18	0.05	0.41
	Sulfatos mg/l	627.00	220.50	128.67	9.00	9.00	198.83
	Redox mv	49.00	129.50	137.33	180.00	190.00	137.17
	Oxígeno disuelto mg/l	2.28	2.51	2.37	2.58	2.52	2.45
	DBO mg/l	75.29	85.40	70.34	90.86	54.57	75.29
	DQO mg/l	96.70	106.65	101.13	81.65	10.00	79.23
	SDT	2848.00	2089.00	3026.67	832.00	420.00	1843.13
	SST	378.00	894.00	548.00	1830.50	249.80	780.06
	SSed	0.8	0.7	0.9	1.2	0.8	1

Nota: Grasas, Aceites, Fenoles, Hidrocarburos, Cianuro, Arsénico, Cadmio, Mercurio, Níquel, Plata y Plomo, no detectables.

Fuente: Semillero de Investigación en Biotecnología del Sena, La Salada (Caldas)

2.1.10 Corrosión. Puede definirse como la reacción de un material metálico con el medio que lo rodea. Los productos de esta reacción pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, según sea el caso.

- En general, pudo evidenciarse un comportamiento de corrosión lento, siendo esta la razón de que se encuentren funcionando aún viejos equipos.
- Las tuberías han sufrido una corrosión lenta y natural. No obstante, en las tuberías con mayor tiempo de uso, se evidencia corrosión por “colmatación”, perdiendo así capacidad de transporte.

3. EVALUCION DEL SISTEMA DE BOMBEO EXISTENTE

3.1. METODOLOGÍA

Previamente se identificaron y localizaron, en el plano topográfico de la mina, las estaciones de bombeo (Ver Anexo 2), procediendo a la visita de campo para: 1) referenciar con coordenadas y cotas los puntos exactos de ubicación de las bombas, 2), establecer las características generales de la red, tales como, marca, modelo y tipo de bomba, potencia nominal de los motores, material, diámetro y longitud de la tubería, cualificación y conteo de accesorios, entre otros (Ver Tabla 2), 4) medir el caudal, tensión y corriente de cada sistema.

Posteriormente se realizó el análisis de la información recolectada, hallándose el rendimiento para cada conjunto motor-bomba.

Por último se estudiaron los tiempos de operación y los reportes de fallas o averías para establecer los costos de operación y mantenimiento, así mismo los procedimientos de instalación, operación y mantenimiento.

Con ello se pretende identificar los problemas que puedan existir en el sistema general de bombeo y al hacerlo tomar los correctivos necesarios para su optimización.

3.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE BOMBEO

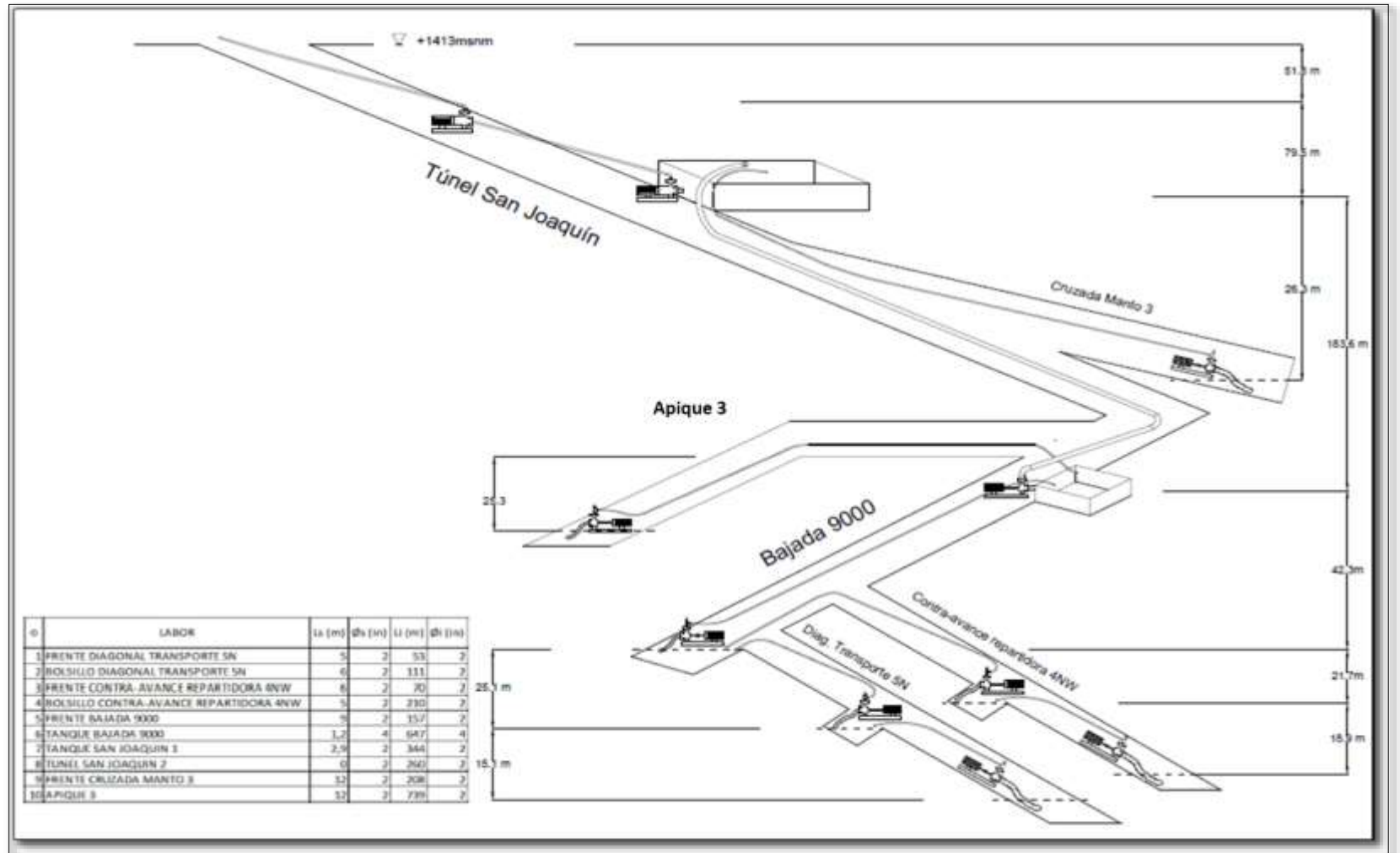
La distribución de los sistemas de bombeo se halla en Manto 1: Bajada 9000, Nivel Repartidora 4NW y Nivel 5N, Manto 3: Ruta de evacuación Apique 3 y la Cruzada en Roca Manto 2 - Manto 3. Para cada sistema de bombeo referenciado en el plano se asignó un número de estación, siendo 10 estaciones estudiadas en total (Ver Figura 5).

Los datos recolectados corresponden a la disposición del sistema de bombeo para el mes de Marzo de 2015.

3.2.1. Bombas. La mina usa electro-bombas centrifugas de eje horizontal, de una, dos y seis etapas de cebado manual y auto-cebado (Ver Tabla 3). Estas bombas son de dos tipos:

- **De eje libre:** son bombas cuyo impulsor, también llamado rodete, rotor o *impeller* posee un eje libre donde se instala un acople, que puede ser en omega o en araña, para unirlo con el conjunto motor, formando así el grupo motobomba el cual descansa sobre una base metálica estructural que brinda estabilidad en el sistema (Ver Figura 6).

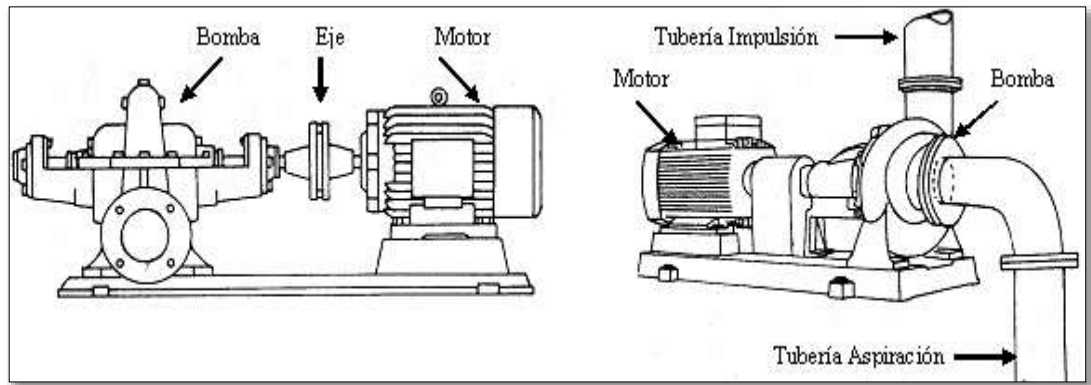
Figura 5. Esquema del sistema de bombeo de la mina de carbón San Fernando.



Fuente: Autor.

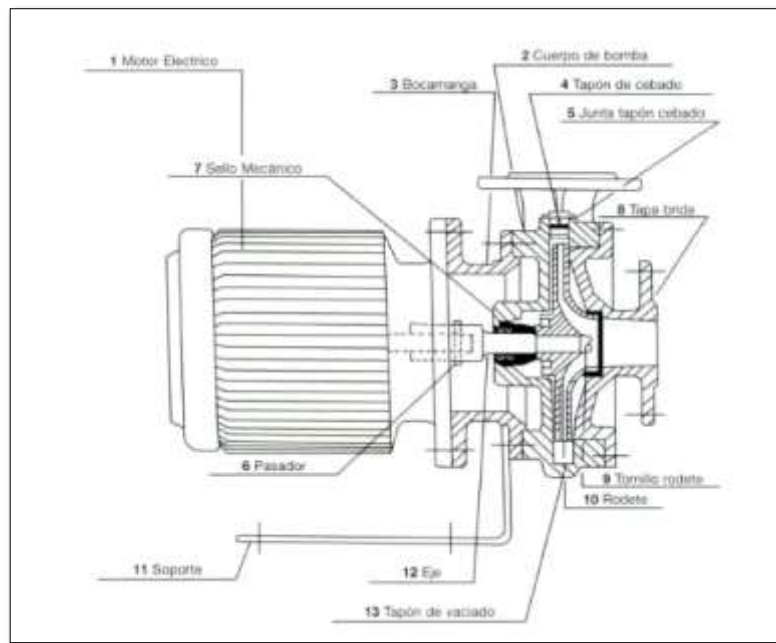
- **Monoblock:** son aquellas bombas que tienen el conjunto motor integrado, formando una sola estructura, es decir, que el sistema tiene y comparte un eje de rotación único (Ver Figura 7)

Figura 6. Bomba de eje libre: Disposición del conjunto motor bomba.



Fuente: <http://ocwus.us.es>

Figura 7. Bomba monobloque: Disposición conjunto motor bomba y sus partes.



Fuente: <http://bombas-intercal.com>

Tabla 2. Información recolectada en visitas de campo. Marzo de 2015.

Ø	COORDENADAS		COTA (m)	CARACTERISTICAS DE LA BOMBA					LONGITUD (m)		MATERIAL		ACCESORIOS	
	X	Y	Z	Marca	Modelo	PN (HP)	Ø Succ.	Ø Imp.	Succ.	Imp.	Succión	Imp.	Succión	Impulsión
FRENTE DIAGONAL TRANSPORTE 5NW														
1	1153215,59	1158839,78	1019,1	BARNES	AU 3	10	2	2	5	53	M. Flex.	Tub. PE	1 Grand. 2"	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
BOLSILLO DIAGONAL TRANSPORTE 5NW														
2	1153231,40	1158889,70	1033,0	IHM	5X25 SM	10	2	2	6	111	M. Flex.	Tub. PE	1 Grand. 2"	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
FRENTE CONTRA AVANCE REPARTIDORA 4NW														
3	1153252,20	1158779,64	1018,6	BARNES	AU 3	10	2	2	6	70	M. Flex.	Tub. PE	1 Grand. 2"	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
BOLSILLO CONTRA AVANCE REPARTIDORA 4NW														
4	1153268,12	1158842,29	1036,4	IHM	5X25 SM	10	2	2	5	210	M. Flex.	Tub. PE	1 Grand. 2"	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
FRENTE BAJADA 9000														
5	1153265,24	1158993,87	1056,9	IHM	5X25 SM	30	2	2	9	155	M. Flex.	M.A.P., A. Galv., Tub. PE	1 Grand. 2"	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
TANQUE PRINCIPAL BAJADA 9000														
6	1153408,24	1158992,04	1097,7	IHM	D25-30X6	50	4	4	1,3	642	A. Galv., M. Flex.	A. Galv.	1 V. Comp. 4"	1 CodL.90° 4", 1 CodC.90° 4", 2 V. Cheq. 4"
TANQUE TUNEL SAN JOAQUIN														
7	1153917,78	1159085,53	1281,3	IHM	30HH-25W	25	3	3	3,1	344	A. Galv., M. Flex.	A. Galv.	1 V. Comp. 4"	1 CodC.90° 3", 1 Red.3-2", 2 V. Cheq. 2", 1 V. Comp. 2"
TUNEL SAN JOAQUIN														
*8	1153865,59	1159414,47	1360,8	IHM	30HH-25W	25	3	3	---	260	---	A. Galv.	---	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
FRENTE CRUZADA EN ROCA														
9	1154032,23	1159060,46	1234,6	IHM	5X25 SM	30	2	2	12	203	M. Flex.	A. Galv.	1 Grand. 2"	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
APIQUE 3														
10	1153703,68	1159250,83	1197,1	IHM	5X25 SM	30	2	2	12	724	M. Flex.	Tub. PE	1 Grand. 2"	1 T 2", 1 V. Cheq. 2"
BAJADA 8150														
**11	1153687,45	1158122,25	1042,7	IHM	5X25 SM	30	2	2	---	---	M. Flex.	A. Galv.	---	---
TANQUE NIVEL 3N														
**12	1153688,15	1158549,11	1100,4	IHM	5X25 SM	30	2	2	---	---	M. Flex.	M.A.P	---	---

CONVENCIONES: Ø (Estación), PN (Potencia nominal del motor), Ø (diámetro), M. Flex. (Manguera flexible), Tub. PE (Tubo de polietileno), A. Galv. (Tubo de acero galvanizado), M.A.P. (Manguera de alta presión), Succ. (Succión), Impul. (Impulsión), Grand. (Válvula de pie o granada), V. Comp. (Válvula de compuerta o llave de paso), T (Tee), V. Cheq. (Válvula cheque), CodL (Codo largo), CodC (Codo corto), Red (reducción). *Bomba conectada en serie con la bomba de la fila 7. ** Estaciones actualmente en desuso.

Fuente: Datos del Estudio.

Tabla 3. Especificaciones técnicas de las bombas centrífugas usadas en la mina.

	BOMBA IHM 5X25 SM	
	MARCA:	IHM
	CATEGORIA:	EJE LIBRE
	TIPO DE BOMBA:	CENTRIFUGA
	TIPO DE SELLO:	MECANICO
	CEBADO:	MANUAL
	Ø SUCCION:	2"
	Ø DESCARGA:	2"
	ETAPAS:	1
	BOMBA AU 3	
	MARCA:	BARNES
	CATEGORIA:	EJE LIBRE
	TIPO DE BOMBA:	CENTRIFUGA
	TIPO DE SELLO:	MECANICO
	CEBADO:	AUTO
	Ø SUCCION:	3"
	Ø DESCARGA:	3"
	ETAPAS:	1
	BOMBA IHM 30HH-25TW	
	MARCA:	BARNES
	CATEGORIA:	MONOBLOCK
	TIPO DE BOMBA:	CENTRIFUGA
	TIPO DE SELLO:	MECANICO
	CEBADO:	AUTO
	Ø SUCCION:	3"
	Ø DESCARGA:	3"
	ETAPAS:	2
	BOMBA IHM D25 30X6	
	MARCA:	IHM
	CATEGORIA:	EJE LIBRE
	TIPO DE BOMBA:	CENTRIFUGA
	TIPO DE SELLO:	MECANICO
	CEBADO:	AUTO
	Ø SUCCION:	2 1/2"
	Ø DESCARGA:	2 1/2"
	ETAPAS:	6
	HP:	50
	RPM:	3500

Fuente: Datos del estudio.

3.2.2. Motores. Las bombas de eje libre utilizan motores eléctricos anti explosión con potencias nominales de 10, 25, 30 y 50 HP. Para las bombas monoblock los motores son convencionales, lo que significa que no puede usarse en zonas clasificadas, su potencia nominal es de 10 HP, las especificaciones técnicas de esto puede verse en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones técnicas del motor Standard Efficiency-IE1.

	MOTOR IE1	
	MARCA:	WEG
	CATEGORIA:	ANTI EXPLOSION
	TIPO DE MOTOR:	ELECTRICO
	FASES:	3
	POLOS:	II
	TENSION:	208-460 V
	lamp.:	VARIABLE
	HP:	10-50 HP
	RPM:	3500

Fuente: Datos del estudio.

3.2.3. Tanques y depósitos de recolección. La mina cuenta con depósitos de agua denominados bolsillos, similares a los nichos de seguridad para protección del personal, pero con dimensiones mayores, a donde es bombeada el agua de los frentes en avance, y desde allí es llevada a tanques de recolección contruidos en concreto, a partir de los cuales se envía el agua a superficie, estos tanques a su vez funcionan como pequeños sedimentadores al dividirse en dos paneles, empleando la técnica de rebose.

Los tanques poseen un tubo en una de sus caras, a 45 cm del fondo, el cual sobresale a lado y lado de la pared y sirve como medio de succión para la bomba (Ver Figura 8).

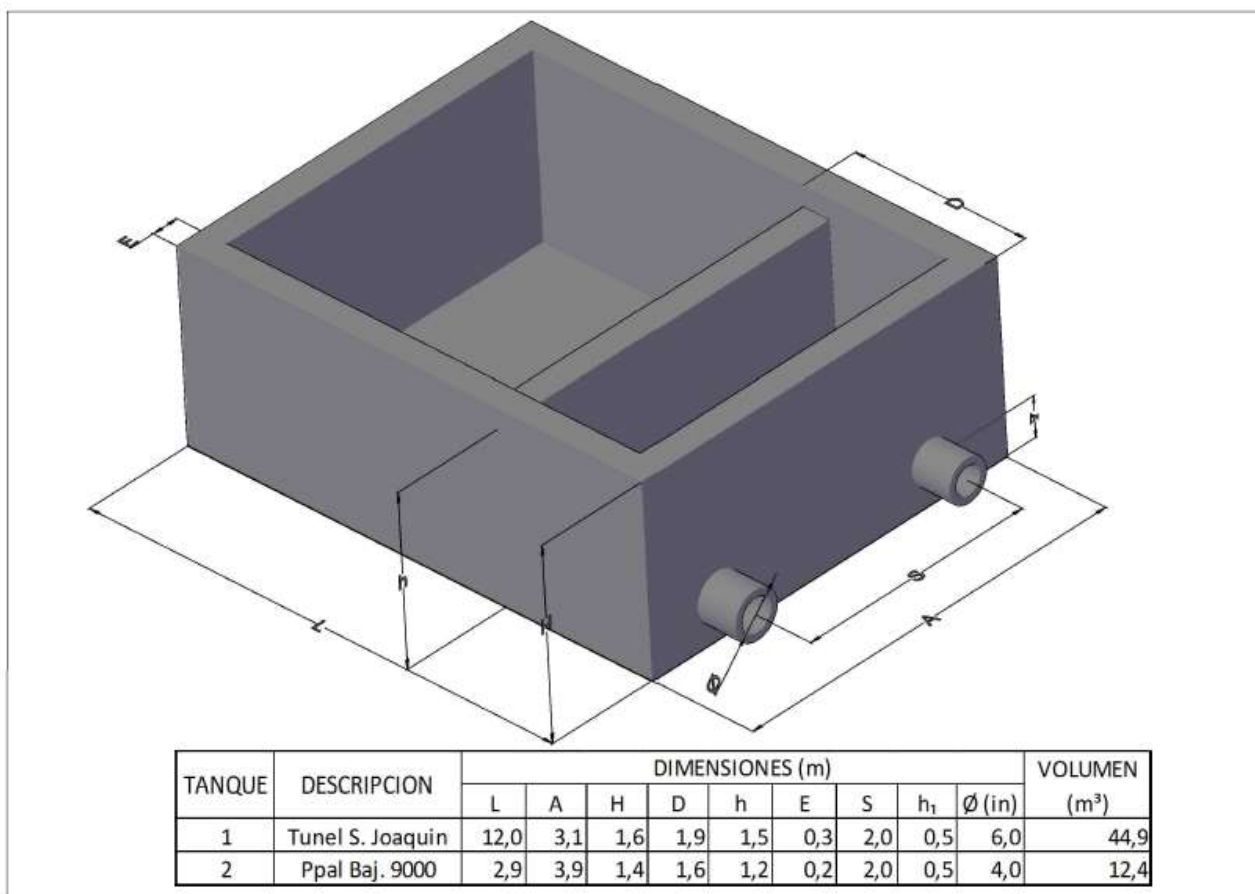
Las bombas instaladas en los tanques tienen succión positiva, es decir, que la entrada de succión se encuentra por debajo del nivel del agua, mientras que en los bolsillos la bomba se encuentra por encima de este, al igual que en los frentes en avance (succión negativa).

La construcción de estos tanques es importante por dos razones fundamentales:

- 1) Por las largas distancias de la mina se requiere de depósitos con gran capacidad que permitan, con los equipos disponibles, la evacuación de las aguas subterráneas.

- 2) Permiten la sedimentación parcial de los sólidos en suspensión, logrando el tratamiento primario de estas aguas antes de ser vertidas en los afluentes hídricos superficiales.

Figura 8. Dimensiones de los tanques sedimentadores.



Fuente: Datos del estudio.

3.2.4. Tubería y accesorios. La tubería de succión en los tanques del Túnel San Joaquín y la Bajada 9000, consta de tramos con tubo de acero galvanizado de 6" y 4" de diámetro, atravesando una de sus paredes creando una entrada en borda, y tramos de manguera flexible de 2" y 4" de diámetro, respectivamente. Para las bombas ubicadas en frentes y bolsillos se emplea la manguera flexible de 2" de diámetro, con longitudes de 5, 6 y 11 metros.

La tubería de impulsión emplea tubos de acero galvanizado de 2" y 4" de diámetro con 6 metros de longitud cada uno, acopladas con uniones excéntricas flexibles marca victaulic; tubo de polietileno de 2" de diámetro con longitudes variables, unidas con niples metálicos y sunchadas con abrazaderas en acero inoxidable, y manguera de alta presión de 2" de diámetro en un pequeño tramo.

Los tipos de tubería y los accesorios usados en la succión y la impulsión pueden observarse en la Figura 9.

Figura 9. Tubería y accesorios.



Fuente: Autor.

3.2.5. Caudales (Q). Los caudales medidos corresponden a la cantidad de agua infiltrada en la mina y a la capacidad de descarga de las bombas instaladas.

El caudal de las infiltraciones fue medido mediante pruebas de bombeo, las cuales se hicieron en los frentes de las labores afectadas. Este método consiste en evacuar, con el uso de una bomba, un volumen de agua conocido y tomar el tiempo de recarga o recuperación de ese mismo volumen. La operación se repite tantas veces como sea posible para obtener un valor promedio ajustado a la realidad, en este caso las pruebas se hicieron durante un turno completo de ocho (8) horas por cinco (5) días en cada frente (Ver Anexo 3).

La capacidad de la bomba, en función del caudal o gasto, fue medida en la descarga de cada sistema de bombeo mediante el método volumétrico, el cual consiste en la utilización de un recipiente de volumen conocido al cual se le toma el tiempo promedio de llenado, obteniendo los datos suficientes para hallar la relación volumen/tiempo o caudal. Los resultados de esta medición se muestran en la Tabla 7. Columna 1.

3.3. ANALISIS DE LA INFORMACION

3.3.1. Equilibrio hidráulico del sistema. La evaluación del equilibrio hidráulico del sistema de bombeo consiste en realizar el balance energético del mismo, en este, se contabilizan la energía cinética, energía potencial y las pérdidas de energía.

La importancia de establecer el equilibrio hidráulico radica en que a través de él puede determinarse la eficiencia de los sistemas de bombeo.

3.3.2. Carga estática total. La carga estática total se define como la carga que debe mover la bomba al elevar un fluido desde un punto A hasta un punto B ubicados en cotas diferentes. Este parámetro se calcula mediante la expresión:

$$H_E(m) = H_D - H_S + \frac{P_D - P_S}{\gamma} \quad [1]$$

Donde:

H_E : Carga estática total.

H_D : Altura de descarga.

H_S : Altura de succión.

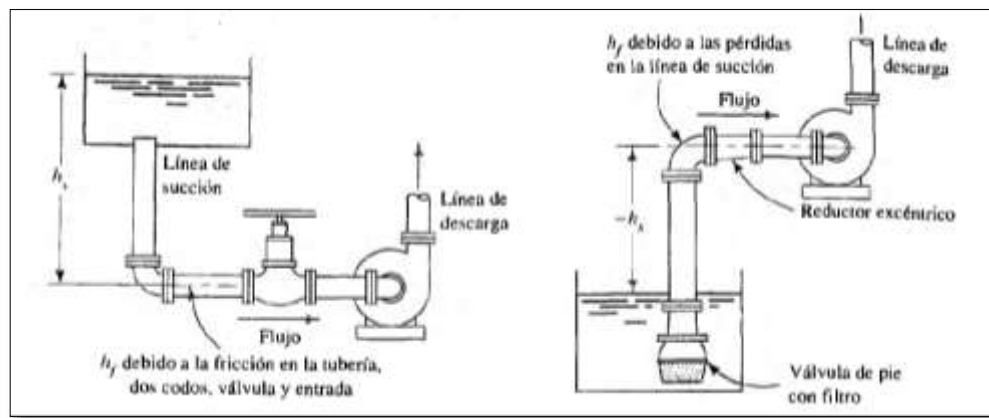
P_D : Presión en el recipiente de descarga.

P_S : Presión en el recipiente de succión.

γ : Peso específico del fluido.

El valor de H_S es positivo si la succión de la bomba se encuentra por debajo de la superficie del fluido en el depósito de captación y es negativo si la succión de la bomba se encuentra por encima del nivel del fluido en el depósito (Ver Figura 10).

Figura 10. Altura de succión respecto al nivel del fluido en el depósito.



Fuente: Mecánica de fluidos. Robert Mott, 2006.

Para este caso, al encontrarse los depósitos al descubierto y bajo influencia de la misma presión dentro de la atmosfera minera, se calculó la carga estática haciendo el término: $\frac{P_D - P_S}{\gamma} = 0$ en la ecuación [1] (Ver Tabla 7tabla. Columna 10).

3.3.3. Perdidas de energía en el sistema. Estas pérdidas, también conocidas como perdidas de carga o carga dinámica, obedecen a la fricción y la turbulencia que experimenta el fluido al ser transportado a través de ductos o tubería y dependen básicamente del factor de fricción, longitud y diámetro de la tubería, los accesorios (perdidas de carga locales), el fluido a bombear y la velocidad del fluido.

Perdidas de carga por fricción en tuberías.

Estas pérdidas se calcularon por el método empírico de Darcy-Weisbach:

$$h_L(m) = f \left(\frac{L}{D} \right) \frac{v^2}{2g} \quad [2]$$

Donde:

f : factor de fricción (adimensional)
 L : longitud de la tubería (m)
 D : diámetro de la tubería (m)
 v : velocidad del fluido (m/s)
 g : aceleración de la gravedad (m/s²)

El factor de fricción (f) se calculó mediante la ecuación explícita de Swamee-Jain (1976):

$$f = 1.325 \left\{ \ln \left[0.27 \left(\frac{e}{D} \right) + 5.74 \left(\frac{1}{Re} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2} \quad [3]$$

$$Re = \frac{vD\rho}{\mu} \quad [4]$$

Donde:

(e/D) : rugosidad relativa (adimensional)
 Re : número de Reynolds (adimensional)
 ρ : densidad del fluido (Kg/m³)
 μ : viscosidad cinemática del fluido (s²/ m)

La ecuación [4] o número de Reynolds, establece el régimen de flujo, laminar para $2000 < Re \leq 4000$ y turbulento para $Re > 4000$.

La ecuación [3] se cumple para flujo completamente turbulento y considera las propiedades del fluido como su densidad y viscosidad cinemática, las cuales a su vez varían con las condiciones de presión y temperatura; razón por la cual fue elegido como el método de cálculo del coeficiente de fricción, los datos reportan un error promedio del 1% en comparación con el método iterativo de Colebrook-White¹.

Perdidas de carga en accesorios o pérdidas locales.

Las pérdidas de carga por fricción en accesorios o pérdidas locales, en la succión e impulsión (h_{fs-i}), se hallaron empleado el método de Darcy-Weisbach [2] (Ver Tabla 7. Columna 9), donde L toma el valor de la longitud equivalente, la cual puede determinarse mediante la ecuación:

$$L_{eq}(m) = k \frac{v^2}{2g} \quad [5]$$

Dónde:

k : coeficiente de pérdida.

Para el cálculo longitud equivalente en metros de tubería para cada accesorio fue tomada de la Tabla 5.

Otras pérdidas como las ocasionadas por reducciones abruptas se calcularon hallando el valor aproximado de k para cada caso según Munson (1994), mediante la expresión:

$$k = 0,42 * \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right) \quad [6]$$

Y reemplazando este valor en la ecuación:

¹ ORTIZ, L. Enrique et. Al. Equilibrio Hidráulico en Sistemas de Bombeo Minero: Estudio de Caso. Ingeniare, Chile. 2010.

$$L_{eq}(m) = k \frac{v_2^2}{2g} \quad [7]$$

Dónde:

D_1 = diámetro de la tubería con mayor área transversal (m).

D_2 = diámetro de la tubería con menor área transversal (m).

v_2 = velocidad en la tubería de menor diámetro (m/s).

La longitud equivalente total de las pérdidas por accesorios en metros de tubería se halló en la succión e impulsión ($\sum L_{eq.s-i}$) para cada estación, como se muestra en la Tabla 6.

3.3.4. Carga dinámica total. Para la evaluación del sistema es importante conocer la carga total del sistema, esto es, la suma de la carga estática total y la carga dinámica (Ver Tabla 7. Columna 11).

$$H_{Total} = H_{Estática} + H_{Dinámica} \quad [8]$$

Es decir:

$$H_{Total} = H_{Estática} + h_{fs} + h_{fi} + h_{ls-i} \quad [9]$$

Dónde:

h_{ls-i} : pérdidas de carga en accesorios o locales (m).

h_{fs} : pérdida de carga por ficción en tuberías (m).

h_{fi} : perdidas de carga por fricción en la impulsión (m)

3.3.5. Eficiencia del sistema.

Potencia real consumida por el sistema

Para llegar al cálculo de la potencia consumida por el sistema (Ver Tabla 7. Columna 15) se realizó la medición del voltaje y amperaje de cada motor y se tomó el valor en placa para el factor de potencia ($\cos \phi$).

$$P_{consumida}(kW) = \frac{\sqrt{3} VI \cos \phi}{1000} \quad [10]$$

En la ecuación [10] la $\sqrt{3}$ se incluye a la formula general de potencia por ser el sistema trifásico.

Tabla 5. Longitudes equivalentes a pérdidas locales (en metros de tubería de hierro fundido).

Diámetro (in)	Codo 90° Radio Largo	Codo 90° Radio medio	Codo 90° Radio corto	Codo 45°	Curva 90° R/D 1 1/2	Curva 90° R/D 1	Curva 45°	Entrada normal	Entrada de borda	Válvula de compuerta abierta	Válvula tipo globo abierta	Válvula de ángulo abierta	Té paso directo	Té salida lateral	Té salida bilateral	Válvula de pie	Salida de tubería	Varilla de retención tipo liviana	Válvula de retención tipo pesado
1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1	1	3,6	0,4	1,1	1,6
3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10	0,9	2,7	4
1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1	3,2	4,8
2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14	1,5	4,2	6,4
2 1/2	1,3	1,7	2	0,9	0,8	1	0,5	0,9	1,9	0,4	21	10	1,3	4,3	4,3	17	1,9	5,2	8,1
3	1,6	2,1	2,5	1,2	1	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26	13	1,6	5,2	5,2	20	2,2	6,3	9,7
4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34	17	2,1	6,7	6,7	23	3,2	6,4	12,9
5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2	4	0,9	43	21	2,7	8,4	8,4	30	4	10,4	16,1
6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5	1,1	51	26	3,4	10	10	39	5	12,5	19,3
8	4,3	5,5	6,4	3	2,4	3,3	1,5	3,5	6	1,4	67	34	4,3	13	13	52	6	16	25
10	5,5	6,7	7,9	3,8	3	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85	43	5,5	16	16	65	7,5	20	32
12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9	2,1	102	51	6,1	19	19	78	9	24	38
14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11	2,4	120	60	7,3	22	22	90	11	28	45

Nota: las longitudes equivalentes de la tabla corresponden a tuberías de hierro fundido. Deben usarse factores de corrección para otros materiales, $FC = (C_{material}/100)^{1.85}$. $C_{A. galv. (Nuevo y usado)} = 125$.

Fuente: Azevedo N., J. y Acosta A., G. 1975.

Tabla 6. Perdidas de carga locales expresadas en metros de longitud equivalente de tubería.

Para las bombas en las estaciones 1-5, 8-10.

Cant.	Accesorio	Diámetro (in)	Longitud equivalente (m)	Longitud equivalente total (m)
1	Entrada normal	2	1,1	1,1
1	Válvula de pie	2	21,2	21,2
1	T paso lateral	2	5,3	5,3
1	Válvula cheque	2	6,3	6,3
1	Salida de tubería	2	2,3	2,3
$\Sigma \text{Leq.s-i}$				36,2

Para la bomba en la estación 6.

Cant.	Accesorio	Diámetro (in)	Longitud equivalente (m)	Longitud equivalente total (m)
1	Entrada en borda	4	4,8	4,8
1	Válvula de compuerta	4	1,1	1,1
1	Codo corto 90°	4	5,1	5,1
2	Codo largo 90°	4	3,2	6,4
2	Válvula cheque	4	9,7	19,4
1	Salida de tubería	4	4,8	4,8
$\Sigma \text{Leq.s-i}$				41,6

Para la bomba en la estación 7.

Cant.	Accesorio	Diámetro (in)	Longitud equivalente (m)	Longitud equivalente total (m)
1	Entrada en borda	6	7,6	7,6
2	Válvula de compuerta	4	1,1	2,2
1	Contracción abrupta	6-4	0,01	0,01
1	Contracción abrupta	4-2	0,01	0,01
2	Codo corto 90°	2	2,6	5,2
1	Reducción gradual	3-2	0,01	0,01
2	Válvula cheque	2	9,7	19,4
1	Salida de tubería	2	2,3	2,3
$\Sigma \text{Leq.s-i}$				36,7

Fuente: Autor.

Eficiencia del conjunto motor-bomba (η_{total})

Igualando la ecuación [10] a la expresión para calcular la potencia total de un sistema de bombeo [11] verificamos que las bombas son máquinas que transforman energía en función de su rendimiento.

$$P_{total\ del\ sistema} \left(\frac{kgf \cdot m}{s} \right) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_{total}} \quad [11]$$

Dónde:

γ : Peso específico del fluido (kgf/m³)

Q : Caudal (m³/s)

H : Altura dinámica total (m)

η_{total} : Eficiencia del conjunto motor-bomba ($\eta_{total} = \eta_{motor} \cdot \eta_{bomba}$)

$$1kW = 102.032 \left(\frac{kgf \cdot m}{s} \right)$$

$$\eta_{total}(\%) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{P_{total\ del\ sistema} \cdot 102.032} * 100 \quad [12]$$

Donde la $P_{total\ del\ sistema}$ corresponde a la potencia real consumida por el sistema. Los resultados de la evaluación del sistema se observan en la tabla 6.

3.3.6. Resumen Tabla 7. Resultados de la evaluación del sistema de bombeo de La Mina de Carbón San Fernando.

Columna 1: Caudal en galones por minuto.

Columna 2: Diámetro de la succión e impulsión en pulgadas.

Columna 3: Velocidad de flujo en metros sobre segundo.

Columna 4: Longitud de tubería de succión en metros.

Columna 5: Longitud de tubería de impulsión en metros.

Columna 6: Longitud equivalente en metros de tubería de los accesorios en la succión e impulsión.

Columna 7: Pérdida de carga por fricción en la tubería de succión en metros.

Columna 8: Pérdida de carga por fricción en la tubería de impulsión en metros.

Columna 9: Pérdida de carga por fricción en accesorios en la tubería de succión e impulsión en metros.

Columna 10: Carga estática total en metros.

Columna 11: Carga dinámica o cabeza total del sistema en metros.

Columna 12: Voltaje en voltios.

Columna 13: Intensidad de la corriente en amperios.

Columna 14: Factor de potencia leído en placa (adimensional)

Columna 15: Potencia real consumida por el sistema en kilowatts

Columna 16: Eficiencia total del sistema en porcentaje.

Tabla 7. Resultados de la evaluación del sistema de bombeo de La Mina de Carbón San Fernando.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	<i>Q (gpm)</i>	<i>DN (in)</i>	<i>Vi (m/s)</i>	<i>Ls (m)</i>	<i>Li (m)</i>	<i>Les-i (m)</i>	<i>hfs (m)</i>	<i>hfi (m)</i>	<i>hfs-i (m)</i>	<i>he (m)</i>	<i>H (m)</i>	<i>V (voltios)</i>	<i>I (amp.)</i>	<i>COSφ</i>	<i>Pconsumida (kW)</i>	<i>ηtotal (%)</i>
	FRENTE DIAGONAL TRANSPORTE 5NW															
1	62,5	2,0	1,95	5	53	36,2	0,25	2,70	1,85	15,1	19,90	461	7,1	0,88	5,0	15%
	BOLSILLO DIAGONAL TRANSPORTE 5NW															
2	29,4	2,0	0,92	6	111	36,2	0,07	1,25	0,41	25,1	26,83	461	9,2	0,88	6,4	8%
	FRENTE CONTRA AVANCE REPARTIDORA 4NW															
3	45,5	2,0	1,41	6	70	36,2	0,16	1,89	0,98	18,9	21,97	461	7,2	0,88	5,0	12%
	BOLSILLO CONTRA AVANCE REPARTIDORA 4NW															
4	28,7	2,0	0,89	5	210	36,2	0,05	2,26	0,39	21,7	24,40	461	10,3	0,88	7,3	6%
	FRENTE BAJADA 9000															
5	35,7	2,0	1,11	9	157	36,2	0,15	7,79	2,44	42,3	52,63	461	18,9	0,88	13,3	9%
	TANQUE PRINCIPAL BAJADA 9000															
6	125	4,0	0,97	1,2	647	41,6	0,02	14,41	0,93	183,6	198,92	457	45,4	0,88	31,6	48%
	TANQUE TUNEL SAN JOAQUIN															
7	54,4	2,0	1,69	2,9	344	36,7	0,08	13,28	1,42	79,5	94,31	463	24,6	0,88	17,4	18%
	TUNEL SAN JOAQUIN															
8	54,4	2,0	1,69	0	260	36,2	0,00	40,63	5,66	51,8	98,07	463	25,4	0,88	17,9	18%
	FRENTE CRUZADA EN ROCA															
9	62,5	2,0	1,95	12	208	36,2	0,61	15,27	1,85	26,3	43,99	461	24,3	0,88	17,1	10%
	APIQUE 3															
10	62,5	2,0	1,95	12	739	36,2	0,61	38,99	1,85	25,3	66,75	458	25,3	0,88	17,7	15%

Fuente: Datos del estudio.

3.3.7. Tiempos de operación y tiempos muertos. La mina cuenta con tres turnos laborales, es decir que, las operaciones mineras cubren las 24 horas del día, sin embargo, esto no se cumple en todas las labores de la mina, sino en las consideradas de mayor importancia, según lo establecido en el planeamiento minero.

Una de las prioridades de la mina es el bombeo de las aguas a superficie por lo cual, este se realiza durante los tres turnos. Los tiempos de trabajo de las bombas son muy variables, ya que todo depende de la percepción del operario quien decide en que momento iniciar y terminar la labor de bombeo en los frentes y bolsillos. No obstante, el tiempo de trabajo en horas*día, puede calcularse al relacionar el Caudal entregado o recibido, que para las estaciones en los frentes de trabajo corresponde a las infiltraciones, con la capacidad de descarga (Q) de la bomba receptora, así:

$$t = \frac{Q_{recibido}}{Q_{descargado}} * 24hrs$$

En la Tabla 8 se muestran los tiempos de trabajo calculados para cada estación. En el Anexo 4, se detalla el proceso iterativo de cálculo.

Tabla 8. Tiempo de trabajo del sistema de bombeo en cada estación.

	Ubicación	Bomba	Turnos	t(h*día)
1	Frente Diagonal Transporte 5N	BARNES AU3	3	2,8
2	Bolsillo Diagonal Transporte 5N	IHM 5X25 SM	3	6,0
3	Frente Contra Avance Repartidora 4NW	BARNES AU3	3	6,0
4	Bolsillo Contra Avance Repartidora 4NW	IHM 5X25 SM	3	9,5
5	Frente Bajada 9000	IHM 5X25 SM	3	12,6
6	Tanque Principal Bajada 9000	IHM D25-30X6	3	6,5
7	Tanque Túnel San Joaquín	IHM 30HH-25W	3	16,2
8	Túnel San Joaquín	IHM 30HH-25W	3	16,2
9	Frente Cruzada En Roca	IHM 5X25 SM	1	1,5
10	Apique 3	IHM 5X25 SM	1*	5,8

**Las operaciones de bombeo en esta labor se realizan día por medio.*

Fuente: Autor.

3.3.8. Procedimiento estándar de instalación, operación y mantenimiento. A pesar de su importancia los procedimientos de instalación, operación y mantenimiento, no han sido estandarizados por la empresa. No obstante, en cuanto a la instalación de las bombas se cuenta con la asesoría del fabricante y para el mantenimiento, con el manual técnico del equipo de bombeo.

En un 90% el trabajo de mantenimiento es de tipo correctivo, las dificultades de la realización del mantenimiento preventivo se debe al sobrecargo de tareas para el personal designado y a problemas logísticos.

3.3.9. Reporte de fallas o averías. Una falla importante en el diseño general del sistema de bombeo, consiste en la recirculación de un porcentaje considerable de caudal bombeado. Esto ocurre en la estación ubicada en el Tanque del Túnel San Joaquín, dado que en los momentos críticos de la operación (cuando todas las bombas se encuentran encendidas), una parte del caudal entregado sobrepasa la capacidad de las estaciones 7 y 8, causando el desborde del caudal sobrante, el cual, circula a lo largo de las vías principales de acceso (Túnel S. Joaquín y Bajada 9000), superando en algunos casos la capacidad de las cunetas, razón por la cual, se constituye además en un problema de seguridad.

Los reportes de falla o avería de equipos de bombeo son principalmente por el desgaste de los componentes del sistema, especialmente los inherentes a la bomba como tal. Los daños más frecuentes ocurren en los sellos mecánicos, rodamientos y eje, con menor frecuencia se reporta el desgaste del buje y rodete o impulsor, la causa principal de estos es la abrasión, oxidación y corrosión producida por el agua y su alto contenido de sólidos en suspensión, otro factor importante es la manipulación ya que la mayoría de estos daños se hacen visibles cuando el equipo presenta un calentamiento excesivo debido a que trabajan en vacío, esto es, el fenómeno de cavitación, lo que sugiere, el mal cebado de las bombas o problemas en la succión. Las elevadas temperaturas que alcanza la bomba contribuyen al desgaste de sus componentes.

Las averías reportadas y su frecuencia para los meses de marzo, abril y mayo (en transcurso) de 2015, fueron tomadas de las bitácoras de la Jefatura de Mecánica y Mantenimiento de la mina (Ver Anexo 5), y son las que se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Fallas o averías reportadas durante los últimos tres meses.

	FALLA O AVERÍA REPORTADA	FRECUENCIA			CONSOLIDADO
		Marzo	Abril	Mayo	TRIMESTRE
1	Desgaste sello mecánico	6	5	1	12
2	Desgaste de elastómero	2	7	1	10
3	Desgaste rodamientos	6	3	1	10
4	Daños de cuñas y tornillería	3	2	1	6
5	Desgaste del eje	3			3
6	Desgaste del buje o camisa	2		1	3
7	Desgaste/rotura acople motor-bomba	2			2
8	Desgaste de Impulsor o rodete	2			2
9	Daños en la succión o impulsión		2		2
10	Daños en el tanque	1	1		2
11	Daños en el motor	1			1
	Otros*	1	1		2

**Falla o avería no especificada en bitácora.*

Fuente: Datos del Estudio.

3.4. ANALISIS DE RESULTADOS

Las eficiencias encontradas son muy bajas, lo que indujo a investigar las posibles causas, para ello, se realiza el análisis por separado, de cada una de las partes constituyentes del sistema.

3.4.1. Motor. Las potencias nominales de los motores son de 10, 25, 30 y 50 HP, conectados a un sistema trifásico de 460 V que bajo óptimas condiciones de funcionamiento ofrecerían un rendimiento no menor al 80%. En función de la potencia real consumida y su relación con la potencia nominal se establecieron las siguientes eficiencias:

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P _{nominal} (HP)	10	10	10	10	30	50	25	25	30	30
η motor	67%	86%	67%	97%	59%	85%	93%	96%	76%	79%

Como puede observarse existen pérdidas del 13% en los sistemas de las estaciones 1 y 3; y del 21% en la estación 5, tomando como eficiencia optima un valor mínimo del 80%.

3.4.2. Tuberías. Las pérdidas en tuberías se calculan en función de su rugosidad, la cual aumenta con el tiempo de uso y el fluido transportado. En la mina existen tuberías con tiempo de instalación muy variable, algunos tramos tienen instaladas tuberías reutilizadas, recuperadas de otras labores, y dada la dificultad de establecer la rugosidad mediante la observación directa, se tomaron los valores de rugosidad absoluta preestablecidos para tuberías de acero galvanizado nuevo y usado ($e=0,15\text{mm}$), y materiales plásticos ($e=0,0015\text{mm}$) (Ahmed N. 1987.; Sotelo A. 1982).

No obstante, debemos tener en cuenta que los valores de rugosidad reales se encuentran muy por encima de los valores utilizados para el cálculo y bajo la estimación de más de 5 años de uso, de al menos la mitad de la tubería empleada, tendremos que las pérdidas obtenidas serán mayores, por lo cual su incidencia en el bajo rendimiento de los sistemas de bombeo es muy importante, debido a que: *a mayor rugosidad, menor capacidad de transporte.*

Por ejemplo, en la Mina Nechí, en condiciones similares a las de Carbones San Fernando, debido a la cercanía, explotación de los mismos mantos y similitud en el sistema de bombeo, se pudo observar mediante medición manométrica que las tuberías con un uso de aproximadamente 8 años llegaron a presentar rugosidades de 4,8 mm para tubería PVC y 4,95 mm para tuberías de hierro galvanizado, lo

que se traduce en un porcentaje de obstrucción del 18%, estimado para tuberías de hierro galvanizado con un diámetro de 2".

Otro factor importante, en el cálculo de pérdidas, es la utilización de distintos materiales en varios tramos de tubería de una misma línea de impulsión. Para el caso de las tuberías de polietileno en la mayoría de los casos está constituida por pequeños tramos de tubería unida con niples que para la estación No. 10 Apique 3, por ejemplo, llegan a ser 50 niples. Con frecuencia llegan a encontrarse fugas a lo largo de estas líneas de impulsión.

3.4.3. Bombas. En condiciones óptimas de trabajo, las bombas en general presentan rendimientos entre 50 y 85% dependiendo del tipo de bomba y su capacidad. No obstante, las bombas suelen verse afectadas por diversidad de factores ya que su rendimiento depende en gran medida de las condiciones del sistema.

Según las condiciones, previamente establecidas, hallamos la curva del sistema para cada estación:

La Curva del Sistema relaciona el Caudal vs. H_T (ecuación 8), considerando, para distintos valores de caudal, las pérdidas esperadas por fricción en tuberías y accesorios que integran el sistema, teniendo H_E como una constante.

Se aplica para el cálculo la ecuación de Darcy-Weisbach (ecuación 2) en función del caudal y f será calculado según Swamee-Jain (ecuación 3):

$$h_L = 0,0826 * f * \left(\frac{Q^2}{D^5}\right) * L \quad [13]$$

Dónde:

$$f(Re, \varepsilon_r) \wedge Re(D, v_c) \wedge L = L_i + L_s + L_e$$

Para el cálculo inicial de esta curva, con un $Q=0$, tendremos que $H_T=H_E$ ya que las pérdidas (h_L) se hacen iguales a cero. Luego se hace un proceso iterativo aumentando el valor de Q tantas veces como sea necesario, hallando para cada valor, un valor de H_T . Finalmente los resultados se tabulan y grafican (Ver Figura 11).

En la Figura 11, se observa que el punto de operación actual de la bomba, según el caudal medido y la H_T calculada (Ver Tabla 7. Columnas 1 y 11), se encuentra muy desfasado con respecto a la curva característica de la bomba. Lo cual indica que la bomba no trabaja en su punto óptimo de operación.

²Tomado de: MURILLO, Isis. MONTOYA, Juan. Evaluación Técnico Económica y Rediseño del Sistema de Bombeo de una Mina de Carbón. UNAL. Medellín, Col. 1994. Pag. 98-101.

Para el caso se calculó la eficiencia de trabajo de cada bomba, obteniendo el siguiente resultado:

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Q_{medido} (gpm)	62,5	29,4	45,5	28,7	35,7	125	54,4	54,4	62,5	62,5
η bomba	22%	9%	18%	6%	15%	56%	19%	19%	13%	19%

Como puede apreciarse el rendimiento de las bombas está muy por debajo del valor esperado, tomando como mínimo una eficiencia del 50%, así pues se reportan pérdidas de entre 28 y 44%, con excepción de la bomba situada en la estación 6.

Las bajas eficiencias en una bomba centrífuga se deben a que ésta experimenta en su operación una serie de problemas de tipo hidráulico y mecánico. Las dificultades hidráulicas pueden hacer que una bomba falle hasta no descargar el fluido o hacerlo en una cantidad insuficiente, desarrollar presiones insuficientes, perder el cebado después de arrancar o consumir energía excesiva. Las dificultades mecánicas pueden aparecer en sellos, rodamientos, impulsor, acople, etc. (Ver Tabla 10).

Tabla 10. Problemas hidráulicos y mecánicos detectados en la operación de la bomba en cada estación.

TIPO	DESCRIPCIÓN	EFECTO	ESTACIONES									
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HIDRAULICO	Alta concentración de SST en el agua	Abrasión, colmatación, corrosión.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	H_T menor que la carga proyectada	Consumo excesivo de potencia.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Entradas de aire a la tubería de succión	Cavitación, <Q descargado, pérdida del cebado.	x	x	x	x	x				x	x
	Fugas del fluido en acoples y tubería	Cavitación, <Q descargado.	x	x	x	x	x				x	x
MECANICO	Válvula de pie parcial o totalmente obstruida	<Q descargado.	x	x	x	x	x				x	x
	Impulsor desgastado o averiado	Pérdida de presión, <Q descargado.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Sellos mecánicos inadecuados	Desgaste, averías.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Eje torcido	Desgaste, averías.	x	x	x	x	x				x	x
	Ejes sin buje o camisa (recubrimiento)	Desgaste, averías.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Rodamientos defectuosos	Desgaste, averías.	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	Impulsor parcialmente obstruido	Desgaste, alto consumo de potencia.	x	x	x	x	x				x	x
	Mala nivelación conjunto motor-bomba	Desgaste, averías.	x	x	x	x	x				x	x

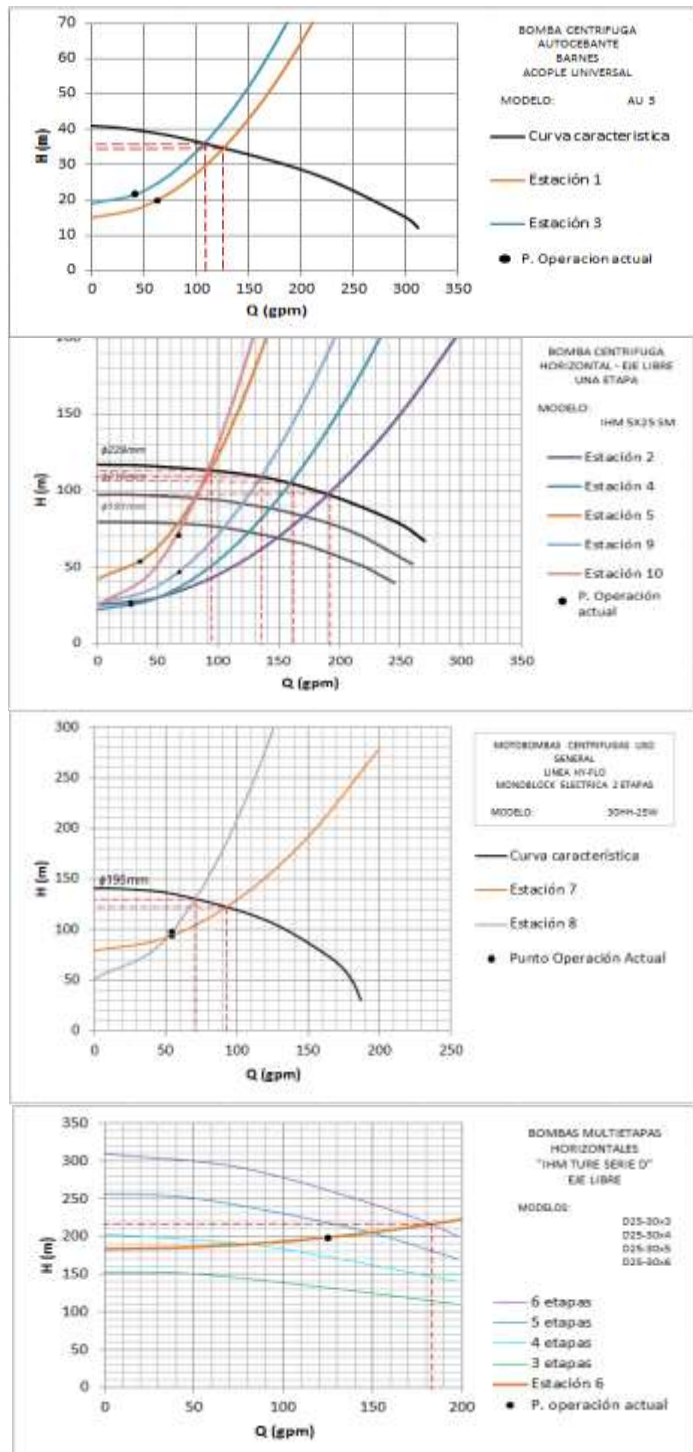
Fuente: El Autor.

Por lo general, las dificultades hidráulicas y mecánicas se presentan combinadas, y se constituyen en la causa parcial de los bajos rendimientos del sistema. Por otro lado, se tienen las pérdidas en tubería y el mal diseño de la red, especialmente en la elección de materiales y diámetros, también es un factor importante la incorrecta manipulación de los equipos de bombeo al momento de ser operados y durante el mantenimiento.

Figura 11. Curva característica de las estaciones de bombeo y su punto de operación.

DATOS CURVA DEL SISTEMA

Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)
Estación 1		Estación 6	
0	15	0	184
50	15	50	186
100	17	100	193
150	19	150	206
200	21	200	223
250	25	250	245
300	29	300	272
Estación 2		Estación 7	
0	25	0	80
50	30	50	92
100	45	100	129
150	70	150	192
200	105	200	279
250	150	250	332
300	205	300	523
Estación 3		Estación 8	
0	19	0	52
50	19	50	91
100	21	100	208
150	23	150	404
200	26	200	678
250	31	250	1030
300	36	300	1409
Estación 4		Estación 9	
0	22	0	26
50	30	50	38
100	54	100	72
150	95	150	128
200	153	200	208
250	227	250	310
300	317	300	435
Estación 5		Estación 10	
0	42	42	25
50	63	63	52
100	124	124	131
150	225	225	264
200	368	368	450
250	551	551	688
300	775	775	980



Las líneas punteadas muestran el punto óptimo de operación para las condiciones dadas.

Fuente: El Autor.

3.4.4. Planeación. La falta de planeación en el diseño del sistema, la selección e instalación de las bombas es otro factor determinante en la baja eficiencia de los sistemas de bombeo, ya que además de considerar el diferencial geométrico de altura, las pérdidas de carga en tuberías y accesorios, debe considerar el NSHP requerido y las características físico-químicas del fluido a transportar para prevenir el desgaste por abrasión o ataque químico que pueden sufrir.

Este aspecto toma mayor protagonismo en la necesidad de emplear estaciones móviles, las cuales cambian el punto de operación con el avance de los frentes donde se encuentran instaladas. A esto se suma la ausencia de mantenimiento preventivo y la baja disponibilidad del stock necesario para mantener la operación a tope de los equipos.

3.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA INSTALADO

3.5.1. Costos por consumo de energía eléctrica. El consumo de energía eléctrica del sistema de bombeo se establece teniendo en cuenta el valor promedio del costo unitario de energía que aplicó para la empresa en los meses de Marzo y Abril, multiplicado la potencia consumida por el tiempo de trabajo en horas día del sistema por los treinta días del mes.

Costo Unitario Promedio= \$ 275,7

Tabla 11. Costos por consumo de energía eléctrica.

	<i>Ubicación</i>	<i>Bomba</i>	<i>P_{consumida}</i> <i>(kW)</i>	<i>t_(hrs)</i>	<i>Costo</i> <i>kW-mes (\$)</i>
1	Frente Diagonal Transporte 5N	BARNES AU3	5,0	2,8	\$ 115.536,35
2	Bolsillo Diagonal Transporte 5N	IHM 5X25 SM	6,4	6	\$ 319.642,81
3	Frente Contra Avance Repartidora 4NW	BARNES AU3	5,0	6	\$ 249.670,09
4	Bolsillo Contra Avance Repartidora 4NW	IHM 5X25 SM	7,3	9,5	\$ 570.513,98
5	Frente Bajada 9000	IHM 5X25 SM	13,3	12,6	\$ 1.383.995,24
6	Tanque Principal Bajada 9000	IHM D25-30X6	31,6	6,5	\$ 1.700.148,00
7	Tanque Túnel San Joaquín	IHM 30HH-25W	17,4	16,6	\$ 2.386.786,56
8	Túnel San Joaquín	IHM 30HH-25W	17,9	16,6	\$ 2.457.841,10
9	Frente Cruzada En Roca	IHM 5X25 SM	17,1	1,5	\$ 212.279,97
10	Apique 3	IHM 5X25 SM	17,7	5,8	\$ 847.257,29
TOTAL					\$ 10.243.671,37

Fuente: Autor.

3.5.2. Costos de personal. Se estima el salario aproximado mensual, según el pago básico promedio para el personal que interviene en la operación y mantenimiento del sistema de bombeo, el cual se relaciona en la siguiente tabla:

Tabla 12. Costos de personal.

CARGO	CANT.	COSTO UNITARIO	COSTO TOTAL
<i>Operarios</i>	4	\$ 752.500	\$ 3.010.000,00
<i>Técnicos Mecánicos</i>	3	\$ 900.000	\$ 2.700.000,00
<i>Técnicos Eléctricos</i>	3	\$ 900.000	\$ 2.700.000,00
		TOTAL	\$ 8.410.000,00

Fuente: Datos del estudio.

Entonces se tiene que en total el personal designado a la operación, supervisión y mantenimiento de los sistemas de bombeo son 10 personas, distribuidos en tres turnos, cubriendo las 24 horas del día.

3.5.3. Costos de Mantenimiento. El mantenimiento incluye: Sellos mecánicos, rodamientos, elastómeros, acoples, ejes, bujes o camisas, impulsores, grasas y tornillería.

Los costos de mantenimiento se hallaron para cada unidad despachada por el almacén al taller mecánico, en los meses de Marzo, Abril y Mayo de 2015 (Ver Anexo 6). En base a este consolidado trimestral se halló el costo promedio mensual.

Consolidado trimestral en pesos = \$ 18.108.722,00

Costo de mantenimiento promedio mensual = \$ 6.036.240,67

3.5.4. Costo total de operación y mantenimiento. Es la sumatoria de los costos de consumo de electricidad + costos de personal + costos de mantenimiento.

Costo total de operación y mantenimiento mensual = \$ \$10.243.671,37 + \$ 8.410.000,00+ \$ 6.036.240,67 = **\$ 24.689.912,04**

3.6. RECOMENDACIONES GENERALES

Dado los bajos rendimientos en el sistema de bombeo, la administración de CARBONES SAN FERNANDO SAS, solicitó recomendaciones y correctivos que a corto, mediano y largo plazo permitan mejorar la eficiencia de los sistemas de bombeo.

Se realizó entonces, una reunión técnica con el personal mecánico de la empresa y el autor del proyecto. La principal preocupación fue los costos que podría acarrear la sustitución de los equipos de bombeo, razón por la cual, las sugerencias dadas contemplan el uso de los mismos equipos, con algunas excepciones, ya que para algunos casos es imperativo sustituir el motor, la bomba o ambos.

MOTOR

La eficiencia del motor puede verse afectada por dos factores globales que son: Problemas en el suministro de energía eléctrica (variaciones de voltaje o caídas de tensión) y problemas mecánicos (averías en las partes rotatorias del motor – rodamientos– y bobinado). La recomendación general es realizar la revisión técnica de las condiciones de operación del motor y para cada caso aplicar los correctivos propuestos en la Tabla 13.

La aplicación de estas acciones puede mejorar sustancialmente la eficiencia de un motor eléctrico, y con ello reducir las pérdidas energéticas; por ejemplo, la reducción del 30% en las pérdidas de un motor de 10 HP con 82% de eficiencia incrementa su valor a un 87,4%, lo cual también puede representar un beneficio significativo en el consumo energético.

BOMBA

En la Tabla 10, vemos que el bajo rendimiento de las bombas se debe a problemas tanto hidráulicos como mecánicos, para su corrección y elevación de la eficiencia, empleando las mismas bombas, se realiza la nueva curva del sistema para cada caso, considerando que se acogen, de manera general, las siguientes recomendaciones:

- ✓ Sustitución del impulsor por uno de tipo cerrado con el mayor diámetro disponible.
- ✓ Reemplazo de las piezas desgastadas o que hayan cumplido ya con su vida útil, como por ejemplo, los sellos mecánicos.
- ✓ Sustitución de la tubería de succión e impulsión, seleccionando el material y diámetro adecuado, empleando para su empalme uniones excéntricas.
- ✓ Colocación de una jaula que funcione como filtro para evitar la obstrucción en la válvula de pie o granada de succión.
- ✓ Empleo del manual técnico de instalación de bombas centrifugas de eje horizontal (Anexo 7).

Para las **estaciones móviles**, ubicadas en los frentes en avance, se deben establecer los parámetros para la selección de los puntos de construcción de depósitos o bolsillos de descarga, conforme a la capacidad de cada bomba, para alcanzar su punto óptimo de operación. Excepcionalmente, se recomienda unificar las **estaciones 7 y 8** sustituyendo las bombas actualmente instaladas por una única bomba, considerando que existen bombas con capacidad suficiente para realizar el trabajo de forma eficiente y que cumplen además con las exigencias en materia de seguridad, ya que las bombas instaladas son tipo monoblock y éstas no son anti explosión.

En los capítulos siguientes se ajustan las curvas del sistema, se calcula la potencia consumida y los costos de operación considerando que se cumple con las recomendaciones dadas, con algunas aclaraciones y sugerencias puntuales a cada caso.

Tabla 13. Acciones recomendadas para corregir condiciones de operación ineficiente.

CONDICION OBSERVADA	DIAGNOSTICO	ACCIÓN CORRECTIVA PROPUESTA
Voltaje de alimentación por debajo del nominal	El voltaje en el punto de acometida está por debajo del nominal.	a) Corregir con los taps del transformador. (Los taps son los componentes físicos en forma de manija –cambiadores- de un transformador, que se utilizan para graduar la relación de transformación de voltaje y ajustar el voltaje de salida al motor para absorber las variaciones del suministrador). b) Solicitar al suministrador que corrija el problema.
	El voltaje en el punto de acometida presenta variaciones mayores al 5%.	a) Solicitar al suministrador que corrija el problema.
	El voltaje en el punto de acometida es el nominal y no presenta variaciones significativas.	a) Corregir con los taps del transformador.
		b) Practicarle un diagnóstico y mantenimiento al transformador.
Desbalance del voltaje de alimentación al motor	El voltaje en el punto de acometida está desequilibrado.	a) Solicitar al suministrador que corrija el problema.
	El voltaje en la acometida está desbalanceado y en el secundario del transformador está desequilibrado.	a) Practicarle un diagnóstico y mantenimiento al transformador.
	El voltaje en los bornes del secundario del transformador está balanceado y en la alimentación al motor se encuentra desequilibrado.	a) Revisar la conexión de puesta a tierra del transformador y el motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos.
		b) Revisar las conexiones del CCM, arrancador y motor, y en caso de que se detecten problemas, corregirlos.
Desbalance en la corriente demandada por el motor	El desbalance en corriente es inversamente proporcional al desbalance en voltaje.	a) Corregir el desbalance en voltaje.
	El desbalance es producido por una demanda desequilibrada por las fases del motor.	a) Si el desbalance es menor al 5%, practicarle un mantenimiento al motor.
		b) Si el desbalance es mayor al 5%, sustituir el motor por un motor nuevo de alta eficiencia.
La velocidad de operación del motor está por debajo de la velocidad a plena carga	Problemas con rodamientos y/o cojinetes.	a) Lubricar y, en su caso, sustituir los elementos con problemas.
Alta temperatura y/o alta vibración en cojinetes y/o rodamientos		
El motor es de eficiencia estándar y tiene más de 10 años de operación	La eficiencia de operación del motor es baja.	a) Sustituir el motor actual por un motor nuevo de alta eficiencia, de una capacidad tal que opere cerca del 75% de su capacidad.
El motor ha sido reparado (rebobinado) más de dos veces	La eficiencia del motor se encuentra depreciada.	
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga menor al 45%	El motor se encuentra trabajando en una zona donde su eficiencia de operación es baja.	
El motor se encuentra trabajando con un factor de carga mayor al 100%		

Fuente: Banco Interamericano De Desarrollo. Evaluación para Sistemas de Bombeo de Agua, Manual de Eficiencia Energética. 1ª Edición. Washington DC. 2011.

4. OPTIMIZACION DEL SISTEMADE BOMBEO

Atendiendo las recomendaciones anteriores, se establece la disposición del equipo de bombeo, se ajustan las curvas del sistema, se hallan los puntos óptimos de operación y se calcula la potencia consumida para cada estación, con algunas aclaraciones y sugerencias adicionales según corresponda:

4.1. ESTACIONES 1, 3

El diámetro propuesto para la tubería es de 3 in, ya que las bridas de la bomba es de igual diámetro, el material escogido es Acero Galvanizado, para la estación 1, ya que se proyecta en el diseño futuro del sistema, ubicar una estación fija al final de esta labor, para la estación 3, el material será PE ya que esta estación desaparecerá una vez se conecten las labores Diagonal Repartidora 4NW y Diagonal de Transporte 5N (Ver anexo 8).

La situación crítica, en estas estaciones es el alineamiento del conjunto motor bomba y su nivelación. Para evitar cargas adicionales sobre los componentes mecánicos del sistema se propone “*canastear*” por debajo de este. Otra de las recomendaciones es la reducción de la longitud en la tubería de succión, buscando elevar el NSPHa, evitando también curvas y flexiones innecesarias, lo que podría causar la producción de burbujas de aire en su interior. En la Figura 12 puede verse la disposición del sistema propuesto.

Las hojas de cálculo para la perdida carga por fricción en tuberías y accesorios y de la Carga Dinámica Total (H_T) se presentan en el Anexo 9.

La Figura 13 y Figura 14 muestran la curva del sistema propuesto para cada estación.

Para alcanzar la máxima eficiencia del sistema para la Estación 1 (75%), como se aprecia en la Figura 13. Es necesario variar la cota o altura estática (H_E) sumándole unos 5 m, lo que implica desplazar la estación unos 8 m sobre la vía, hacia el frente. En cambio para alcanzar dicha eficiencia en la Estación 3, basta con realizar el cambio de la tubería.

No obstante, podrían darse variaciones de ± 10 m la H_E para ambas estaciones, consiguiendo una eficiencia del 60% pero con un estrecho margen de seguridad. Esto teniendo en cuenta una inclinación de la vía de 10 a 20°.

La potencia consumida y la eficiencia total del sistema propuesto, usando el motor actualmente instalado, serán:

Estación	P. Hidráulica $P = \frac{\gamma * Q * H}{76,04}$	P. Bomba $BHP = \frac{P}{\eta_b}$	P. Sistema $P_s = \frac{P}{\eta_b * \eta_m}$	Eff. Bomba η_b	Eff. Motor η_m	Eff. Total $\eta_b * \eta_m$
1	5	6	9	75%	67%	50%
3	5	6	9	75%	67%	50%

4.2. ESTACIONES 2, 4, 5, 9 Y 10

La representación esquemática del sistema propuesto para las estaciones 2, 4, 5, 9 y 10 puede verse en la Figura 15. Las hojas de cálculo para la pérdida carga por fricción en tuberías y accesorios y de la Carga Dinámica Total (H_T) se presentan en el Anexo 9.

En la Figura 16 se encuentran superpuestas la curva del sistema y la curva característica de la bomba, considerando una tubería de 3 in en Acero Galvanizado, con la cual pueden leerse los puntos de operación para cada estación, y calcularse la eficiencia y consumo del sistema, así:

$$P_s = \frac{P}{\eta_b * \eta_m} = \frac{BHP}{\eta_m}$$

Estación 2

$$BHP = 24 \text{ hp}, \eta_m = 85\%, \eta_b = 65\%$$

$$P_s = 28 \text{ hp}$$

El motor debe ser sustituido por uno con 30 hp de potencia, dado que el motor instalado actualmente es de 10 hp. Así pues:

$$\eta_b * \eta_m = 55\%$$

Estación 4

$$BHP = 24 \text{ hp}, \eta_m = 85\%, \eta_b = 65\%$$

$$P_s = 28 \text{ hp}$$

De igual manera, a la anterior, el motor para esta estación debe ser sustituido por uno con 30 hp de potencia. Así pues:

$$\eta_b * \eta_m = 55\%$$

Estación 5

$$BHP = 24 \text{ hp}, \eta_m = 85\%, \eta_b = 65\%$$

$$P_s = 28 \text{ hp}$$

Dada la baja eficiencia del motor actualmente instalado, este se debe reemplazar por un nuevo motor con 30 hp de potencia. Entonces la eficiencia total del sistema será:

$$\eta_b * \eta_m = 55\%$$

Estación 9

$$BHP = 25 \text{ hp}, \eta_m = 85\%, \eta_b = 65\%$$

$$P_s = 29 \text{ hp}$$

Dada la baja eficiencia del motor actualmente instalado, este se debe reemplazar por un nuevo motor con 30 hp de potencia. Entonces la eficiencia total del sistema será:

$$\eta_b * \eta_m = 55\%$$

Esta estación, se ubica en el frente de la Cruzada en Roca M2-M3, actualmente en avance y con las nuevas condiciones de operación ésta podría desplazarse un máximo de 30 m sobre la vía, hacia el frente, equivalente a un aumento en su altura estática (H_E) de 30 m y funcionar con una eficiencia de 60%.

Estación 10

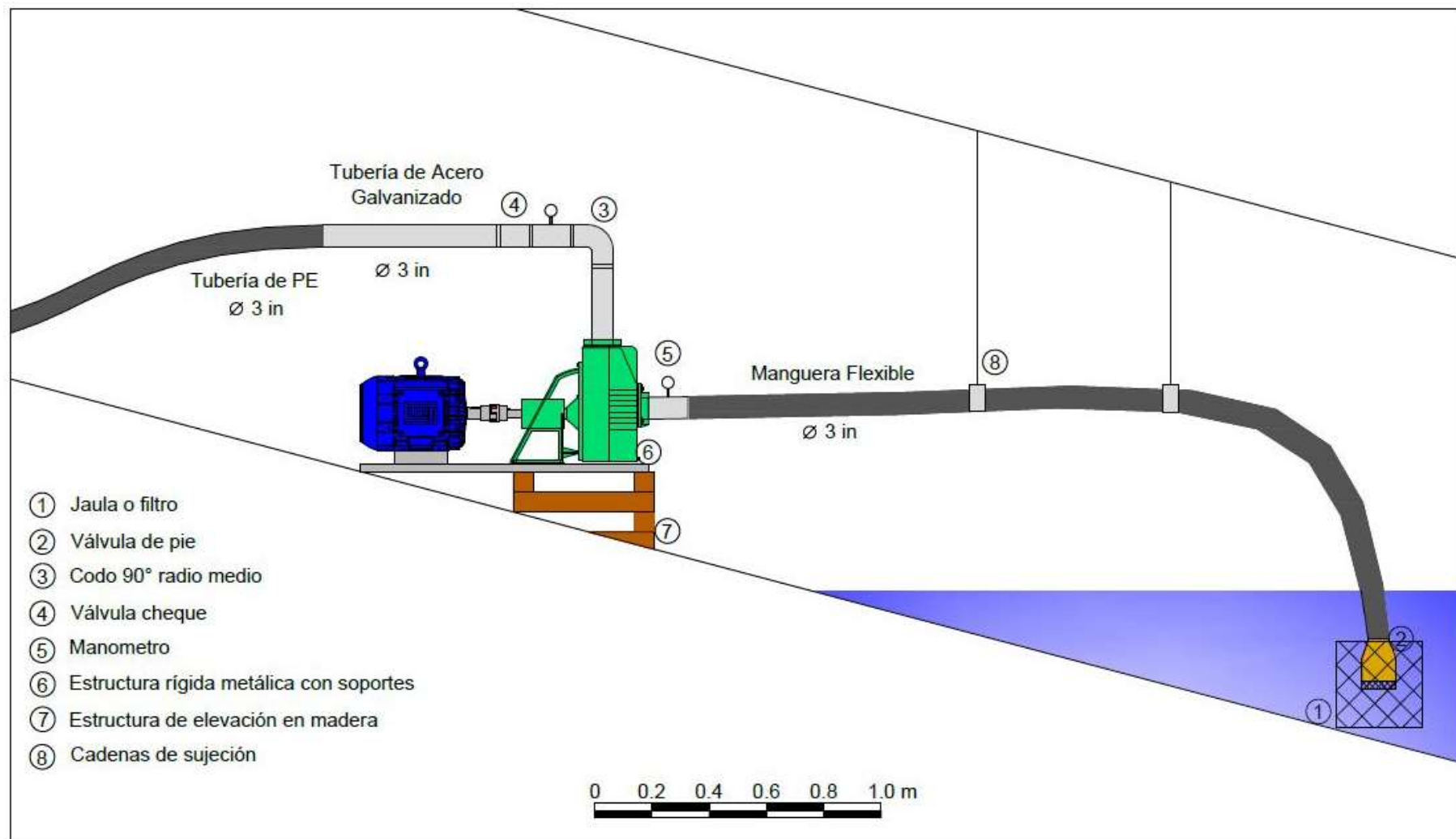
$$BHP = 19 \text{ hp}, \eta_m = 80\%, \eta_b = 60\%$$

$$P_s = 24 \text{ hp}$$

La eficiencia del motor instalado actualmente es cercana al 80% razón por la cual no se considera su reemplazo. Así, la eficiencia total del sistema será:

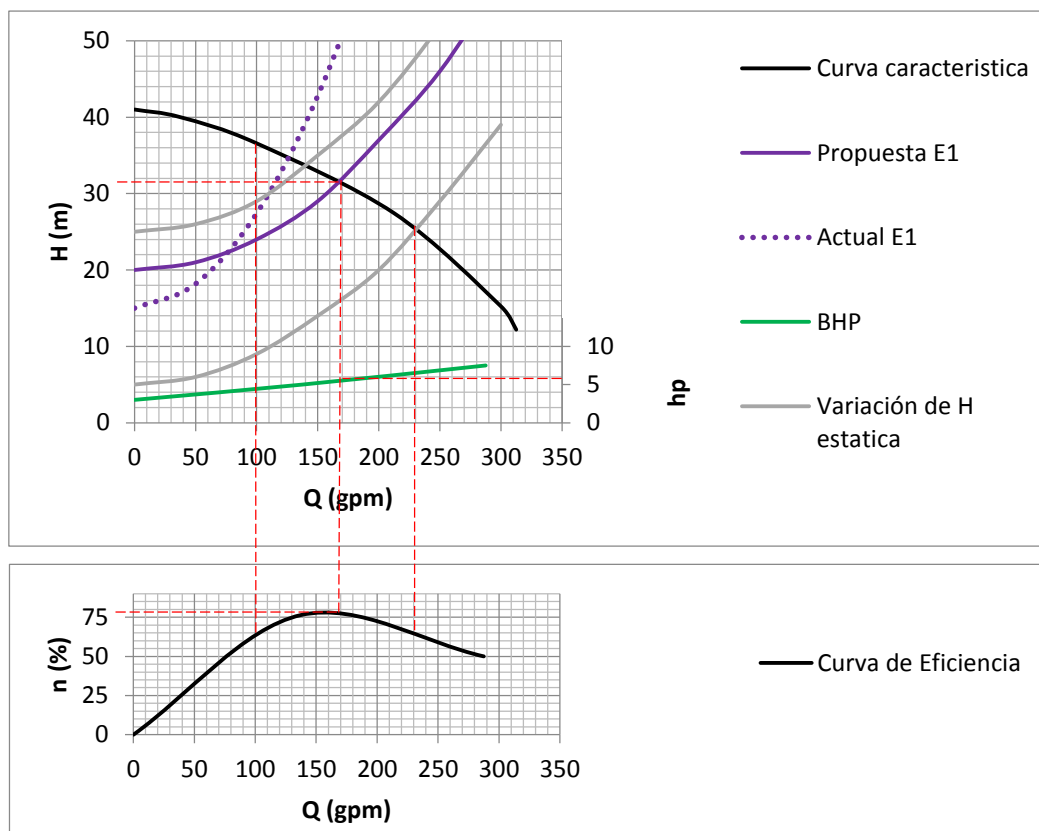
$$\eta_b * \eta_m = 48\%$$

Figura 12. Disposición del sistema propuesto para las estaciones 1 y 3.



Fuente: El Autor.

Figura 13. Curva característica del sistema propuesto: Estación 1.

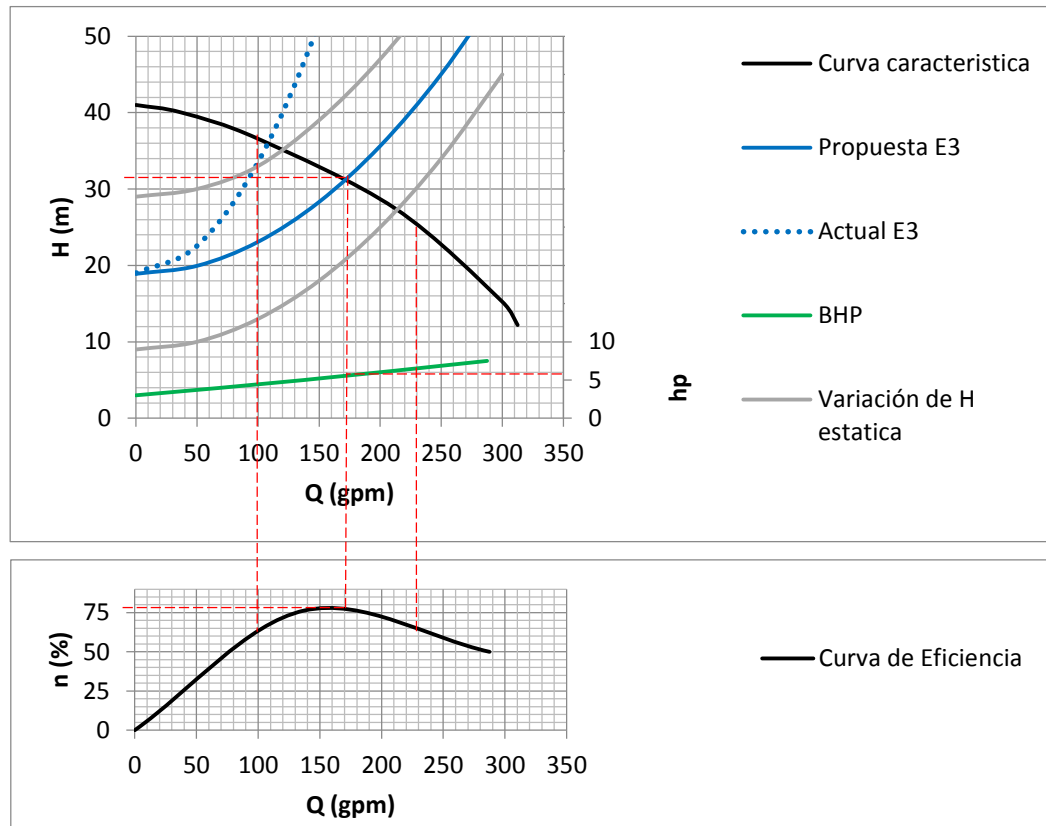


Las líneas punteadas muestran el punto de operación del sistema

Curva Característica Propuesta E1		Curva Característica E1 (+ 10 m de cota)		Curva Característica E1 (-10 m de cota)		Punto Óptimo de Operación	
Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	
0	20	0	25	0	5	170	
50	21	50	26	50	6		
100	24	100	29	100	9	32	
150	29	150	35	150	14		
200	37	200	42	200	20	6	
250	46	250	52	250	29		
300	58	300	64	300	39	75	

Fuente: Datos del estudio.

Figura 14. Curva característica del sistema propuesto: Estación 3.

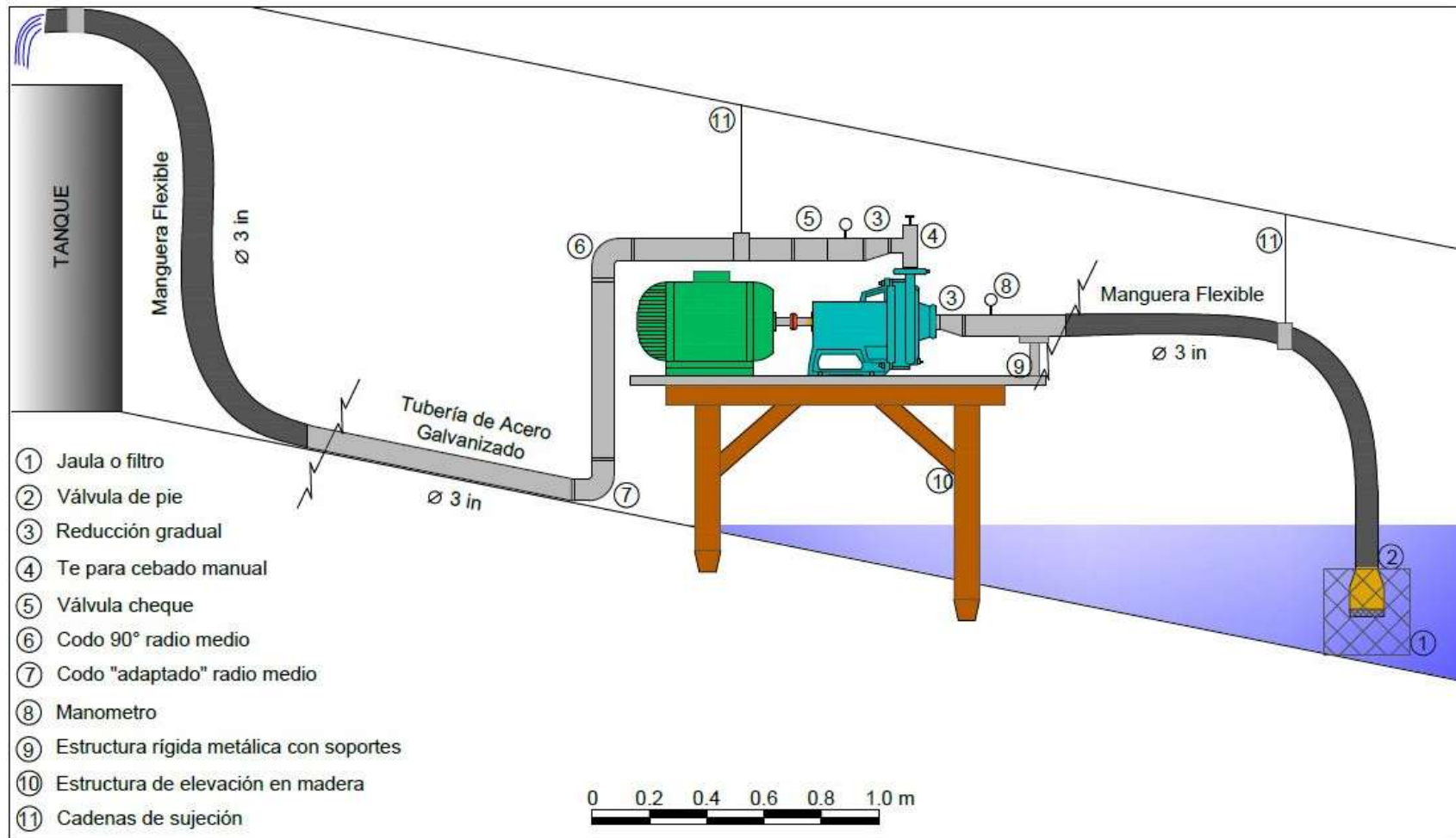


Las líneas punteadas muestran el punto de operación del sistema

Curva Característica Propuesta E3		Curva Característica E3 (+ 10 m de cota)		Curva Característica E3 (-10 m de cota)		Punto Óptimo de Operación	
Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	
0	19	0	29	0	9		170
50	20	50	30	50	10		
100	23	100	33	100	13		32
150	28	150	39	150	18		
200	36	200	47	200	25		6
250	45	250	57	250	34		
300	57	300	69	300	45		75

Fuente: Datos del estudio.

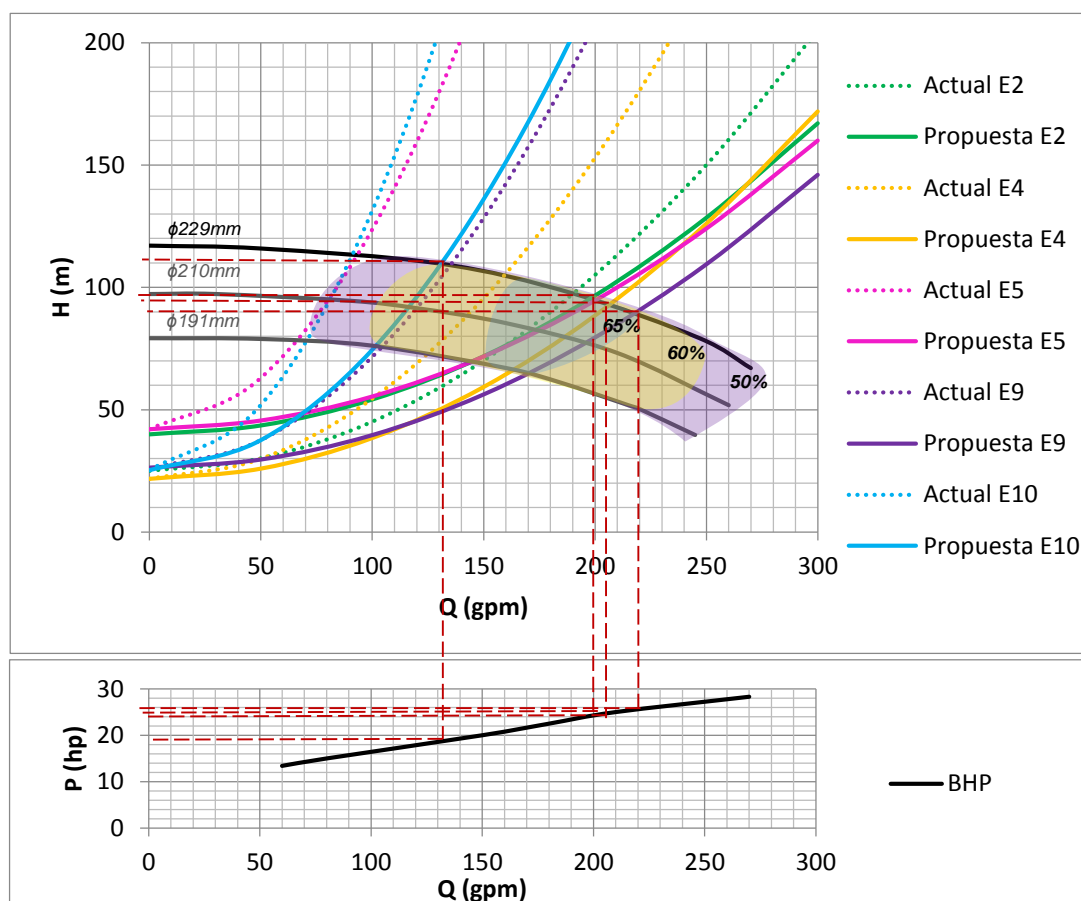
Figura 15. Disposición del sistema propuesto para las estaciones 2, 4, 5, 9 y 10.



Las estaciones 5 y 9 son las únicas que descarga en un tanque. Las demás estaciones omiten el tramo final de manguera flexible en la impulsión.

Fuente: El Autor.

Figura 16. Curva característica sistema propuesto: Estaciones 2, 4, 5, 9 y 10.



Las líneas punteadas muestran el punto de operación del sistema

Curva del sistema Estación 2		Curva del sistema Estación 4		Curva del sistema Estación 5		Curva del sistema Estación 9		Curva del sistema Estación 10	
Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)
0	40	0	22	0	42	0	26	0	25
50	44	50	26	50	46	50	30	50	38
100	54	100	38	100	55	100	40	100	75
150	72	150	59	150	72	150	56	150	136
200	97	200	88	200	95	200	80	200	222
250	128	250	126	250	124	250	110	250	333
300	167	300	172	300	160	300	147	300	468
Punto óptimo de Operación									
Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)	Q (gpm)	H (m)
200	100	209	93	200	100	210	90	131	110
BHP	24	BHP	24	BHP	24	BHP	25	BHP	19

Fuente: Datos del estudio.

4.3. ESTACIONES 7 Y 8

Como se planteó en títulos anteriores, se hace estrictamente necesario unificar estaciones 7 y 8, sustituyéndolas por una única bomba, ubicada en el Tanque del Túnel San Joaquín.

La clave para hacer la selección correcta de la bomba radica en el conocimiento del sistema en que trabajará y la determinación de su eficiencia, para ello debemos conocer dos parámetros iniciales: caudal (Q) y carga (H_T) de diseño, con los cuales se hace una aproximación inicial hacia la determinación del tipo de bomba adecuado, el diámetro del rotor para una eficiencia dada y la potencia hidráulica de la misma.

En el Hydraulic Institute Handbook³ y en otros manuales⁴, aparece el número adimensional, velocidad específica:

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H_T^{3/4}} \quad [13]$$

Donde N es la velocidad de rotación (rpm), Q es la capacidad o caudal (gpm) y H_T es la carga o altura dinámica total (ft).

Estos parámetros son necesarios para determinar la capacidad de todas las bombas centrífugas.

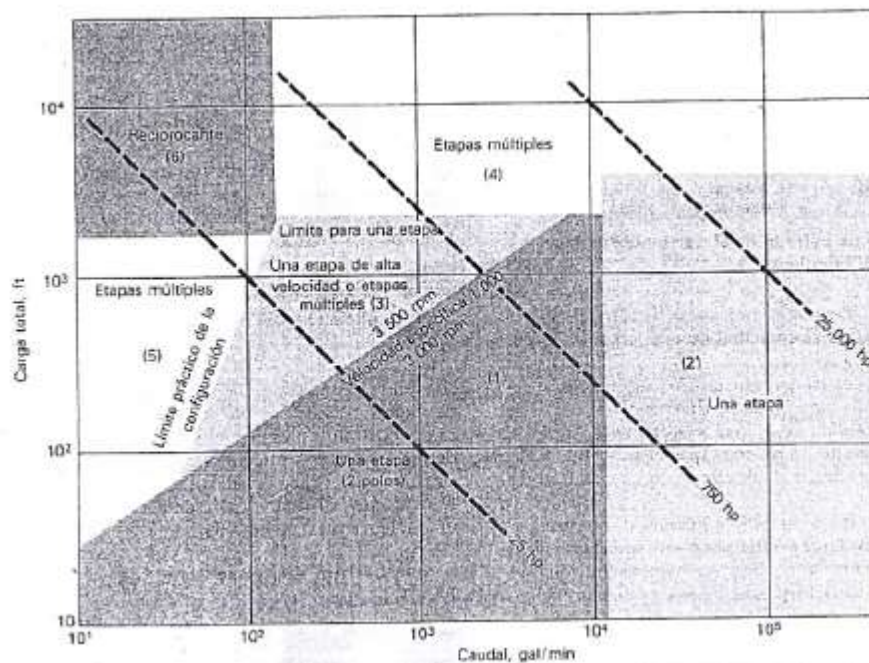
En la Figura 17 se presenta una guía para bombas eficientes con capacidad hasta de 100000 gpm y carga total hasta de 10000 ft y está basada en la velocidad eficiente de la bomba (N_s). La Figura 17 está dividida en seis (6) zonas, cada una de las cuales indica el tipo de bomba que se debe seleccionar para lograr la máxima eficiencia posible, así:

- Zona 1.** Una etapa, 3500 rpm.
- Zona 2.** Una etapa, 1750 rpm o menos.
- Zona 3.** Una etapa, de más de 3500 rpm o de etapas múltiples, de 3500 rpm.
- Zona 4-5.** Etapas múltiples.
- Zona 6.** Reciprocante.

³ Hydraulic Institute Standards for Centrifugal, Rotary and Reciprocating Pumps, 13th ed. Hydraulic Institute, Cleveland, Ohio.

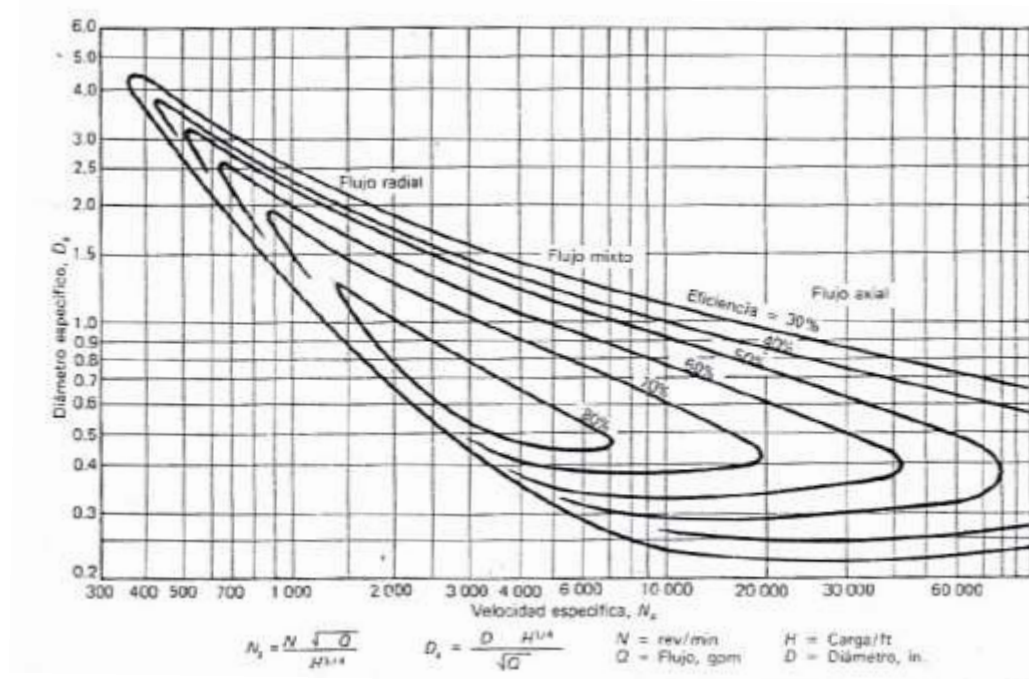
⁴Karassik, I. J., and Krutzsch, W. C., "Pump Handbook", McGraw-Hill, New York, 1976

Figura 17. Guía para la selección del tipo de bomba, basada en la velocidad específica.



Fuente: Bombas, selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill.1992.

Figura 18. Grafica de la velocidad específica para la selección preliminar de bombas, en relación con la eficiencia para distintos diámetros de impulsor.



Fuente: Bombas, selección, uso y mantenimiento. McGraw-Hill.1992.

En la Figura 18 se muestran las curvas de eficiencia en relación con la velocidad específica N_s y el diámetro específico D_s , con lo cual puede hallarse el diámetro del rotor (D) para alcanzar la máxima eficiencia de la bomba centrífuga a un caudal y carga determinados. Esta primera aproximación nos permite buscar entre distintos fabricantes o proveedores de bombas la mejor opción de adquisición. Es de anotar que la gráfica está diseñada para bombas de una sola etapa o *empeller*, no obstante puede emplearse para bombas multietapas usando un valor de H_T dividido entre el número de etapas seleccionado.

Posteriormente se solicita a fabricantes o proveedores información sobre las bombas que mejor se ajusten a los parámetros seleccionados, con esto, el análisis pasará a la determinación de la curva del sistema y su superposición con la curva característica de la bomba preseleccionada, así se determina el punto óptimo de operación.

REQUISITOS DE LA BOMBA

Capacidad

En la Figura 19, se aprecia la distribución esquemática del sistema propuesto y para el mismo se realizó el cálculo de la Altura Dinámica o Carga total (H_T), tomando como datos iniciales los siguientes:

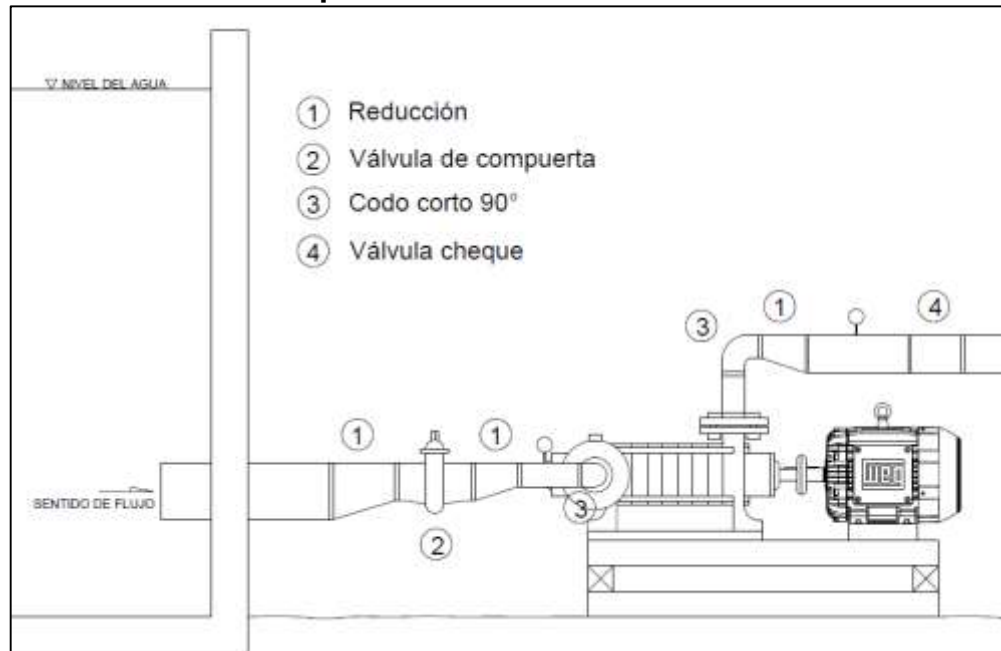
El caudal de diseño (Q) será de 150 gpm ya que la bomba que alimenta al tanque del Túnel San Joaquín entrega un caudal de 125 gpm.

ν_c	$8,03 \times 10^{-7}$	$\frac{m^2}{s}$	(Agua a 30°C).
D	4	in	(Acero Galvanizado).
$L_{Imp.}$	604	m	
$L_{Succ.}$	1	m	
H_E	131,3	m	
$\sum L_{eq.s-i}$	26,23	m	(Ver Figura 19)

Donde ν_c : Viscosidad cinemática del fluido, D: diámetro de la tubería de succión e impulsión, $L_{Succ.}$: Longitud de succión, $L_{Imp.}$: Longitud de impulsión, H_E : Carga estática, $\sum L_{eq.s-i}$: Longitud equivalente de los accesorios en la tubería de succión e impulsión.

La rugosidad absoluta (ϵ) para el Acero Galvanizado es de 0,15 mm.

Figura 19. Representación esquemática del sistema propuesto para el Tanque del Túnel San Joaquín.



Fuente: El Autor.

Tabla 14. Longitud equivalente para cálculo de pérdidas locales: nueva bomba.

Cant.	Accesorio	Diámetro (in)	Longitud equivalente (m)	Longitud equivalente total (m)
1	Entrada en borda	6	7,6	7,6
1	Válvula de compuerta	4	1,1	1,1
1	Reducción gradual	6 a 4	0,01	0,01
2	Reducción gradual	4 a 2½	0,01	0,02
2	Codo corto 90°	2½	3,0	6,0
1	Válvula cheque	4	9,7	9,7
1	Salida de tubería	4	4,8	4,8
$\Sigma \text{Leq.s-i}$				26,23

Fuente: El Autor.

Aplicando la ecuación 2 y la ecuación 8 tendremos que:

$$H_T = 152 \text{ m} = 500 \text{ ft.}$$

Considerando los valores del Q de diseño y la H_T calculada, se halla un punto en la zona 3 de la Figura 17, lo cual sugiere que en términos de eficiencia debe emplearse una bomba de alta velocidad o de etapas múltiples a 3500 rpm con una potencia hidráulica cercana a los 25 HP.

Este resultado, avala nuestra recomendación inicial sobre el tipo de bomba a emplear. Para verificar el número de etapas y determinar el Diámetro del impulsor aplicamos la ecuación 13, dividiendo el valor de H_T entre el número de etapas propuesto, así:

Para

$$H_T = 500 \text{ ft} / 4 \text{ etapas}$$

Tenemos

$$N_s = 1147$$

Entonces para una eficiencia del 70% el Diámetro del impulsor de la bomba (D) debe ser de 6,2 in (Ver Figura 18).

Materiales de fabricación

Debido al alto contenido de Solidos Suspendidos Totales el fluido puede considerarse como una *pasta aguada*⁵, cuyas principales características son: un ph de neutro a medianamente básico y una alta abrasividad. Razón por la cual se exige que la bomba cumpla con las especificaciones de la Tabla 15.

Tabla 15. Materiales para la bomba.

PARTES	MATERIAL
Carcaza	Hierro dúctil /fundición de acero
Impulsor	28% Cromo
Anillos de desgaste	28% Cromo
Camisa de eje	28% Cromo o acero inoxidable 303 recubierta con cerámica (aplicación con plasma)*
Flecha	Acero aleado de alta resistencia a la tensión
Sello mecánico	Carburo de Tungsteno (Ni) y Carburo de Silicio (RB)

*Puede emplearse recubrimiento en cobre.

Fuente: Manual de Bombas de Karassik, Krutzsch, F., M. Ed. McGraw-Hill. Méx. 1983.

La información técnica que se suministró a los distintos proveedores y fabricantes adjunta a la solicitud de cotización de la bomba se muestra en la siguiente tabla:

⁵ Es una mezcla de dos fases: sólido y líquido.

Tabla 16. Exigencias técnicas de la bomba a cotizar.

ESPECIFICACIONES TECNICAS		Servicio: <u>Bombeo aguas de mina</u>	
Empresa: <u>Carbones San Fernando SAS</u>		Tipo de bomba: <u>Horizontal De eje libre</u>	
Localización: <u>Amaga, Antioquia</u>		Cantidad: <u>1</u>	
1	Líquido bombeado	Agua + Sedimentos silíceos (arenas y arcillas)	
2	Temperatura °C/densidad relativa a °C	30	996
3	Caudal (gpm)	150	
4	Carga dinámica total (m)	152	
5	Tipo de bomba/No. Etapas	Centrífuga	4
6	Velocidad de rotación (rpm)	3500	
7	Tipo de impulsor/Diámetro (in)	Cerrado*	6,2*
8	MATERIALES	Carcaza	Hierro dúctil /fundición de acero*
9		Impulsor	28% Cromo*
10		Anillos de desgaste	28% Cromo*
11		Camisa de eje	28% Cromo o acero inoxidable 303 recubierta con cerámica (aplicación con plasma)*
12		Flecha	Acero aleado de alta resistencia a la tensión*
13		Sello mecánico	Carburo de Tungsteno (Ni) y Carburo de Silicio (RB)*

*Según disponibilidad.

Fuente: Datos del estudio.

SELECCIÓN

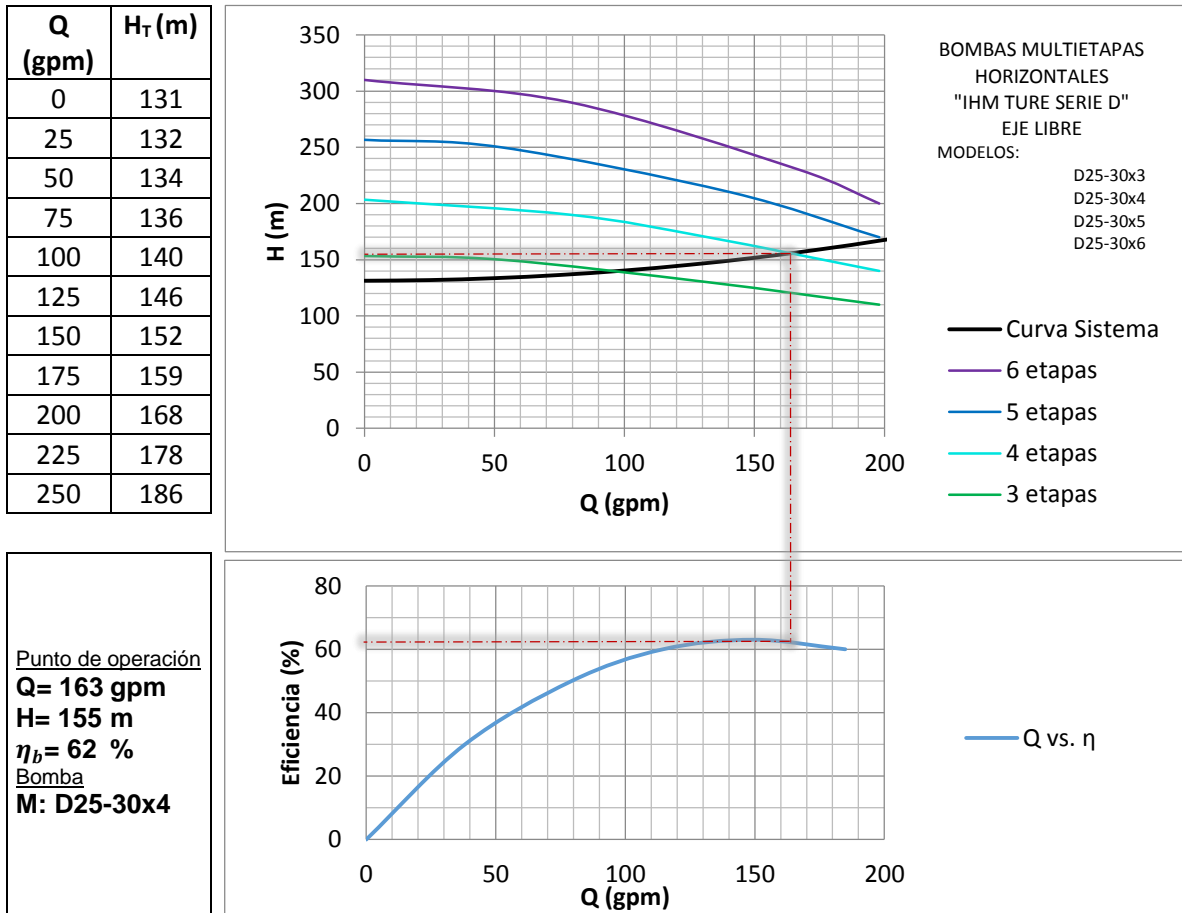
En la Tabla 16 se muestran las especificaciones técnicas de la bomba seleccionada.

Los criterios para su selección fueron: la máxima eficiencia alcanzada, la potencia consumida por el sistema y su costo de adquisición, en el Anexo 10 se detalla la información suministrada por el fabricante.

En la Figura 20 se superponen la curva del sistema con la curva característica de la bomba, estableciendo el punto de operación, con el cual se alcanza un caudal entregado de 163 gpm, lo que supera el caudal de diseño en un 9%, para una eficiencia del 62%, permitiendo tener un margen de seguridad aceptable para pequeños cambios en el sistema.

El cálculo de la Potencia Consumida se muestra en la Tabla 17, con este valor se establece la potencia del motor y por último se calcula la eficiencia total del sistema.

Figura 20. Curva del sistema y curva característica de la bomba seleccionada.



Fuente: El Autor.

Tabla 17. Resumen: cálculo de potencia consumida por el sistema propuesto.

CÁLCULO	ECUACIÓN	PARÁMETROS	RESULTADO
P. teórica o hidráulica (P)	$P(HP) = \frac{\gamma * Q * H}{76,04}$	$\gamma=996 \text{ kg/m}^3$, $Q=0,0103 \text{ m}^3/\text{s}$, $H=155 \text{ m}$	21 HP
P. al freno (BHP)	$P_b = \frac{P}{\eta_b}$	$P=21 \text{ hp}$, $\eta_b=62\%$	34 HP
Potencia del sistema (P_s)	$P_s = \frac{P}{\eta_b * \eta_m}$	$P=22 \text{ hp}$, $\eta_b=62\%$, $\eta_m=85\%$	40 HP

Fuente: Datos del estudio.

El motor elegido para acoplar a la bomba será de 40 HP ya que este es un valor de potencia estándar para la fabricación de motores eléctricos y además cubre la potencia demandada por el sistema. Así pues, la η_{total} o eficiencia del sistema será:

$$\eta_{total} = \eta_b * \eta_m = 53 \%$$

4.4. DISTRUBUCION ESPACACIAL DEL SISTEMA PROPUESTO.

La nueva ubicación espacial de las estaciones de bombeo se establece considerando la proyección de las labores mineras hasta el 2018, año en el cual se espera haber concluido la explotación del Panel 5N (Ver Anexo 8). Esta distribución se espera sea definitiva y permanezca por lo menos hasta el 2020, sin embargo, esto solo se establecerá en la planeación año a año de la mina.

Según las últimas proyecciones el desarrollo de la mina mantiene activa como vía principal de transporte la Diagonal de Transporte 5N a partir de la cual se espera preparar los nuevos paneles para Manto 1.

4.5. ANALISIS ECONOMICO DEL SISTEMA PROPUESTO.

En el análisis económico del sistema propuesto se centra en establecer la relación costo beneficio de la inversión respecto a la evaluación económica del sistema actualmente instalado.

Vale la pena aclarar que en ésta no se incluyen los costos de algunas tareas u operaciones previas correspondientes a adecuaciones locativas, como por ejemplo la construcción del pozo de recolección ubicado en la intercepción del Diagonal de Transporte y el Nivel Bandas Pie de Tajo 5N; limitándose a establecer los costos de adquisición, operación y mantenimiento para el sistema propuesto.

4.5.1. Inversión inicial. Los costos de adquisición e instalación de tuberías, accesorios y equipos se detallan en las Tablas 18, 19, 20 y 21. Al sumar estos costos obtenemos el costo de la inversión total que toma un valor de \$ 122.144.257,62.

3.6.1. Costos de consumo de energía. La Tabla 22 muestra el comparativo de caudal entregado, potencia consumida, tiempo de trabajo, costos por consumo de energía y eficiencia total, para cada estación, en los sistemas: actual y propuesto.

Acoger las recomendaciones anteriormente dadas, significaría un ahorro en el consumo de energía del 53%, lo que correspondería a \$ 68.391.143,36 de pesos anuales.

3.6.2. Costos de mantenimiento. Generalmente el costo de mantenimiento anual en los equipos de bombeo se estima considerando entre el 2 a 10% del capital invertido incluyendo en este valor el costo de repuestos y personal mecánico. El porcentaje escogido dependerá de la complejidad en la operación.

Para este caso se tomará como valor un 15% dado que las condiciones de trabajo así lo requieren, obteniendo como resultado \$ 18.321.638,64.

Adicionalmente se espera una reducción considerable en los costos de mantenimiento, siempre y cuando se cumpla con las recomendaciones dadas, el programa de mantenimiento preventivo y el manual de operación para equipos de bombeo. Razón por la cual debe considerarse el costo de mantenimiento de los equipos actualmente en operación, para lo cual se estima su valor actual y se toma el 15% de éste como costo de mantenimiento, así:

$$\begin{aligned} \text{Costo estimado del equipamiento usado} &= \$ 66.700.000,00 \\ \text{Costo de mantenimiento usado} &= \$ 66.700.000,00 * 0,15 \\ &= \$ 10.005.000,00 \end{aligned}$$

De esta manera el costo total del mantenimiento será de \$ 28.326.638,64 lo que significaría un ahorro anual de \$ 44.108.249,40.

3.6.3. Depreciación anual. Para el cálculo de la depreciación se emplea el método lineal y se asume una vida útil del equipamiento nuevo y usado de 15 y 10 años respectivamente. Así la depreciación será:

$$\begin{aligned} \text{Depreciación equipo nuevo} &= \$ 122.144.257,62 / 15 \text{ años} = \$ 8.142.950,51 \\ \text{Depreciación equipo usado} &= \$ 66.700.000,00 / 10 \text{ años} = \$ 1.920.960,00 \\ \text{Depreciación anual total} &= \$ 10.063.910,5 \end{aligned}$$

3.6.4. Estado de resultados. El ahorro anual generado por la implementación del sistema propuesto en comparación con el sistema actualmente instalado se tomará como la utilidad neta y corresponde a la suma del ahorro en consumo de energía y mantenimiento considerando los demás costos constantes.

$$\begin{aligned} \text{Utilidad Neta} &= \$ 44.108.249,40 + \$ 68.391.143,36 \\ &= \$ 112.499.392,80 \end{aligned}$$

El flujo de caja resulta de restarle los costos de operación y la depreciación a la utilidad neta, es decir, se restan las salidas de las entradas de dinero.

$$\begin{aligned} \text{Flujo de caja} &= \$ 112.499.392,80 - \$ 58.927.137,56 \\ &= \$ 33.444.434,22 \end{aligned}$$

3.6.5. Tasa Interna de Retorno (TIR). Si el flujo de caja se considera constante para un periodo total de 5 años con una inversión inicial de \$ 122.144.257,62. Tenemos que:

$$\text{TIR} = 11\%$$

De esta manera el proyecto se justifica y se considera viable la inversión.

Tabla 18. Costos de adquisición de la tubería.

DESCRIPCIÓN	CANT.	VLR. UND.	VLR. TOTAL
Acero Galvanizado			
Tubería 4 in 604 m	101	\$ 253.980,00	\$ 25.567.320,00
Tubería 3 in 1472 m	245	\$ 174.715,00	\$ 42.863.413,33
Tubo PE 100			
Tubería 3in 129 m		\$ 20.235,45	\$ 2.610.373,05
Manguera Flexible (tubo corrugado PE)			
Manguera 3 in 56 m		\$ 18.420,32	\$ 1.031.537,92
TOTAL			\$ 72.072.644,30

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 19. Costos de adquisición de accesorios.

DESCRIPCION	CANT.	VLR. UND.	VLR. TOTAL
Válvula pie (Bronce) 3 in	7	\$ 202.188,00	\$ 1.415.316,00
Codo 90° radio medio (A. Galv.) 3 in	12	\$ 30.044,00	\$ 360.528,00
	2 ½ in	\$ 18.908,00	\$ 37.816,00
Válvula cheque (A. Galv.) 3 in	7	\$ 598.958,00	\$ 4.192.706,00
	4 in	\$ 939.308,00	\$ 939.308,00
Reducción (A. Galv.) 3 a 2 in	10	\$ 18.870,88	\$ 188.708,80
	4 a 2 ½ in	\$ 35.334,76	\$ 70.669,52
	6 a 4 in	\$ 105.908,00	\$ 105.908,00
Válvula de compuerta (A. Galv.) 4 in	1	\$ 496.709,00	\$ 496.709,00
Te (A. Galv.) 2 in	5	\$ 13.572,00	\$ 67.860,00
TOTAL			\$ 6.460.213,32

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 20. Costo de adquisición de la conjunto motor-bomba IHM D46-30X6 sobre estructura metálica más repuestos por un año.

CANT.	PRODUCTO	DESCRIPCIÓN	VLR.
1	Conjunto motor bomba	Bomba D46-30X6 + Motor WEG anti-explosión IEC Estándar de 40 HP, acoplado sobre estructura metálica.	\$ 17.423.000,00
1	Repuestos	Anillo Desgaste C. Intermedio, Anillo Desgaste C. Succión, Casquillo Sello M, Arosello C. Intermedio, Difusor, Primer Difusor, Rotor (I) Succión, Rotor (II) Difusor.	\$ 1.396.500,00
TOTAL			\$ 18.819.500,00

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 21. Costo de adquisición de motores eléctricos.

CANT	PRODUCTO	DESCRIPCIÓN	VLR. UND.	VLR. TOTAL
4	Motor eléctrico	Motor WEG anti-explosión IEC Eficiencia Estándar de 30 HP.	\$ 6.547.100,00	\$ 26.188.400,00
TOTAL			\$ 26.188.400,00	

Fuente: Datos del estudio.

Tabla 22. Comparativo de los costos de energía entre el sistema actual y el sistema propuesto.

EST.	SISTEMA ACTUAL						SISTEMA PROPUESTO						Δ \$/kWh
	Q (gpm)	P (kW)	t (h*día)	Costo de energía (\$/kWh)	η total		Q (gpm)	P (kW)	t (h*día)	Costo de energía \$/kWh	η total		
1	63	4,99	2,80	\$ 115.536,35	15%		160	6,71	1,10	\$ 61.084,64	50%		\$ 54.451,70
2	29	6,44	6,00	\$ 319.642,81	8%		200	20,89	0,88	\$ 152.032,89	55%		\$ 167.609,92
3	45	5,03	6,00	\$ 249.670,09	12%		172	6,71	1,59	\$ 88.295,08	50%		\$ 161.375,01
4	29	7,26	9,50	\$ 570.513,98	6%		209	20,89	1,31	\$ 226.321,69	55%		\$ 344.192,29
5	36	13,28	12,60	\$ 1.383.995,24	9%		200	20,89	2,25	\$ 388.720,46	55%		\$ 995.274,78
6	125	31,62	6,50	\$ 1.700.148,00	48%		125	31,62	6,50	\$ 1.700.148,00	48%		\$ 0,00
7,8	54	35,29	16,60	\$ 4.844.627,65	32%		163	31,33	5,55	\$ 1.438.265,69	53%		\$ 3.406.361,96
9	63	17,11	1,50	\$ 212.279,97	10%		210	21,63	0,46	\$ 82.310,01	55%		\$ 129.969,96
10	63	17,66	5,80	\$ 847.257,29	15%		131	17,90	2,75	\$ 407.230,96	55%		\$ 440.026,33
Ahorro mensual													\$ 5.699.261,95

Fuente: El Autor.

5. SOLUCIÓN AL MANEJO DE LAS AGUAS RESIDUALES

En el marco de la nueva Ley de Vertimientos, las CAR's requiere a las empresas mineras un permiso de vertimientos puntuales, cuyo requisito indispensable consiste en un documento técnico que sustente el adecuado manejo de las aguas residuales susceptibles de vertimiento en afluentes hídricos superficiales, apoyándose en el Dec. 3930 del 25 de Octubre de 2010 que reglamenta los usos del agua y los residuos líquidos, y en los parámetros y VLMP expedidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible mediante Res. 0631 del 17 Marzo de 2015, según la cual, los parámetros a corregir para mejorar la calidad del agua son:

Tabla 23. Parámetros que exceden los Valores Limite Máximos Permisibles según Res. 0631 del 17 de Marzo de 2015.

PARÁMETRO		No. MUESTRA					
		1	2	3	4	5	6
	DBO mg/l	75.29	85.40	70.34	90.86	54.57	75.29
	SST	378.00	894.00	548.00	1830.50	249.80	780.06

Tomados de la Tabla 1. Resultado de los análisis de laboratorio de las aguas de mina (Capítulo II. Título 2).

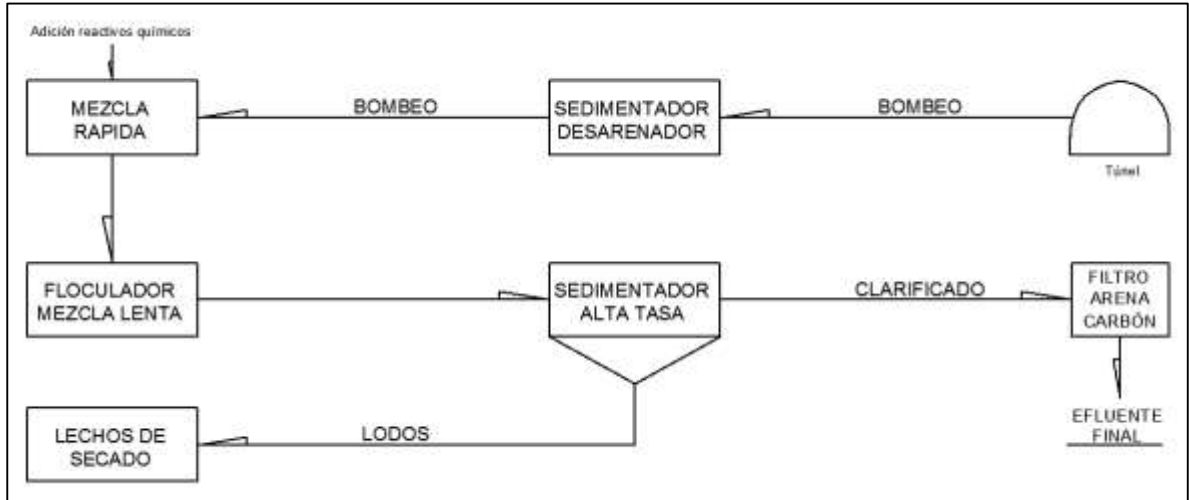
Fuente: Datos del estudio.

En Septiembre de 2012 Carbones San Fernando contrató la caracterización y estudio de tratabilidad de aguas residuales industriales (Ver anexo 11), con esta información como base se realizó la propuesta para el manejo adecuado de estas aguas.

Con la idea de simplificar el sistema de tratabilidad propuesto por la empresa contratada se presenta un nuevo esquema del sistema de tratamiento de clarificación por cuagulación-floculación (Ver Figura 21), en cual, se usa el tanque principal del Túnel San Joaquín como desarenador (sedimentación primaria) y como punto de adición del coagulante (Sulfato de Aluminio Tipo A), se suprime la adición de cal para la corrección del pH, dado que el agua presenta un pH mayor a 7 y la adición del floculante (Acuaflex FC), se prevé, en la Canaleta Parshall, justo antes de la entrada al floculador, aplicando el concepto de resalto hidráulico para lograr el efecto de la mezcla rápida.

Las dosis y los tiempos considerados para el diseño de la planta son los recomendados por dicho estudio esperando alcanzar una eficiencia en la remoción de sólidos suspendidos de al menos un 90% y del 70% para el DBO₅.

Figura 21. Esquema general del sistema de tratamiento propuesto.



Fuente: El Autor.

5.1. DISEÑO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PROPUESTA

El diseño propuesto corresponde a una planta de filtración rápida dado que, para este caso, otros métodos como el de filtración lenta ya han sido descartados experimentalmente.

La tecnología que se pretende emplear corresponde a sistemas convencionales de alta tasa o de tecnología CEPIS/OPS.

Los procesos unitarios de la planta propuesta son:

- Coagulación-floculación;
- Sedimentación y
- Filtración.

Para los cuales se realiza el cálculo y dimensionamiento de las siguientes estructuras:

- Cámara de quietamiento.
- Canaleta Parshall para mezcla rápida.
- Floculador de placas paralelas con flujo horizontal para mezcla lenta.
- Sedimentador laminar o decantador de alta tasa.
- Filtro de arena convencional.

La planta de tratamiento con sus respectivos detalles de diseño se muestra en el Anexo 12 y el proceso de cálculo correspondiente a su dimensionamiento se desarrolla a continuación.

5.2. CÁLCULO Y DIMENSIONAMIENTO

1) CÁMARA DE AQUIETAMIENTO

La cámara de aquietamiento se construye con el fin de reducir la velocidad del fluido a la entrada de la planta de tratamiento de esta forma se disminuye la turbulencia y se garantiza un flujo uniforme, lo que permitiría usar la Canaleta Parshall como medidor de caudal. Para ello la velocidad ascensional debe ser de entre 0,05 a 0,1 m/s. La profundidad puede determinarse, fijando la capacidad para un periodo entre 15 a 60 s.

Para $V=0,05$ m/s

$$Q = Av$$
$$0,0103\text{m}^3/\text{s} = A \cdot 0.05 \text{ m/s}$$

Tenemos:

$$A = 0.206 \text{ m}^2$$
$$L^2 = A$$
$$L = (0.206 \text{ m}^2)^{1/2}$$
$$L = 0,45 \text{ m}$$

Para un tiempo de llenado de 15 s

$$Q = V / t$$
$$Q = A \cdot H / t$$
$$0,0103 \text{ m}^3/\text{s} = 0.206 \text{ m}^2 \cdot H / 15 \text{ s}$$

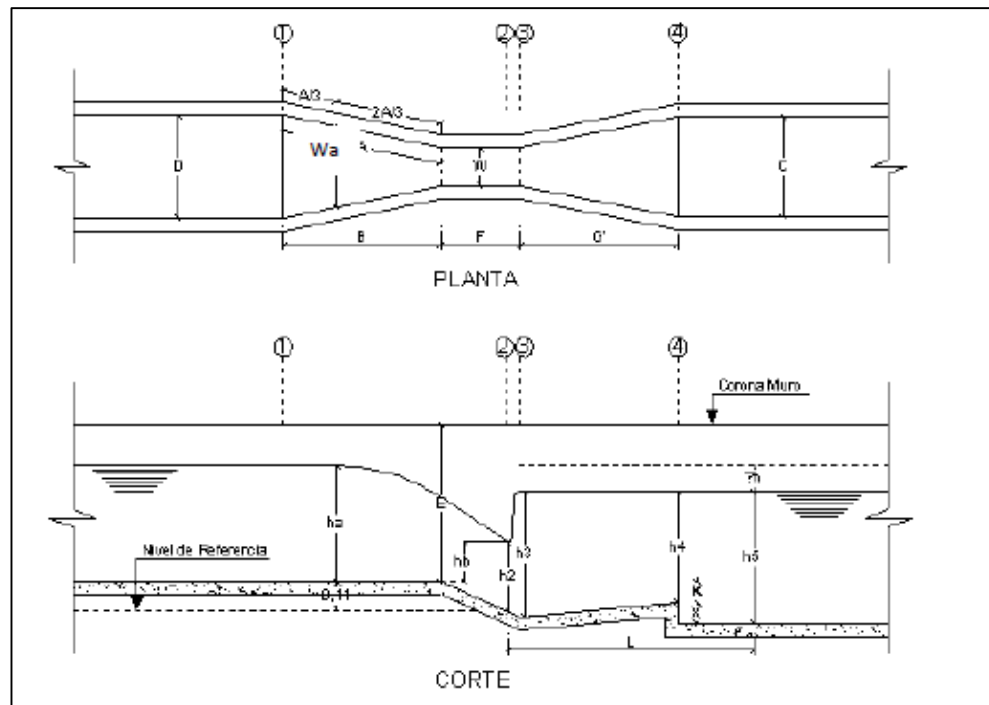
Tenemos:

$$H = 0,75 \text{ m}$$

2) CANALETA PARSHALL

La metodología seguida se basa en el cálculo de la energía en las secciones mostradas en la Fig. 36 y en la suposición de que las pérdidas por fricción dentro de la canaleta son despreciables.

Figura 22. Esquema general para el dimensionamiento de la Canaleta Parshall.



Fuente: El Autor.

Paso 1. Determinación del ancho de la garganta.

Para $Q = 10,3$ Lps

Se tiene $W = 2$ in = 50,8 mm (Ver Tabla 24).

Tabla 24. Determinación del ancho (W) de la Canaleta Parshall en función del caudal (Q).

Ancho W	Límites de caudal (l/s)		Q Prom.
	Q Mínimo	Q Máximo	
1"	0,28	5,67	2,98
2"	0,57	14,15	7,36
3"	0,85	28,31	14,58
6"	1,42	110,44	55,93
9"	2,58	252,00	127,29
12"	3,11	455,90	229,51
18"	4,24	696,50	350,37
24"	11,90	937,30	474,60
36"	17,27	1427,20	722,24
48"	36,81	1922,70	979,76
60"	45,31	2424,00	1234,66
72"	73,62	2931,00	1502,31

Fuente: Romero Rojas, 2008

Paso 2. De la Tabla 25 se toman los valores de C y n. De la Tabla 26 se toman las medidas en centímetros correspondientes al dimensionamiento de la canaleta.

Tabla 25. Valores de C y n para cada ancho (W).

Para Q (l/s) , Ha (mm)				Para Q (m ³ /s), Ha (m)			
W		C	n	W		C	n
in	mm			ft	m		
1	25,4	0,001352	1,55	1	0,30	0,69	1,522
2	50,8	0,002702		1,5	0,46	1,06	1,538
3	76,2	0,003965		2	0,61	1,43	1,55
6	152,4	0,006937	1,58	3	0,91	2,18	1,566
9	228,6	0,013762	1,53	4	1,2192	2,95	1,578
				5	1,524	3,73	1,587
				6	1,8288	4,52	1,595
				7	2,1336	5,31	1,601
				8	2,4384	6,11	1,606
				10	3,048	7,46	1,6

Fuente: R. L. Parshall. 1927.

Tabla 26. Dimensiones típicas de Medidores Parshall en cm.

W	(Cm)	A	B	C	D	E	F	G	K	N
1"	2.5	36.6	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9
2"	5,08	41,4	40,6	13,5	21,4	25,4	11,4	25,4	2,2	4,3
3"	7.6	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7
6"	15.2	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4
9"	22.9	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	61.0	45.7	7.6	22.9
1'	30.5	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
1½'	45.7	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
2'	61.0	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
3'	91.5	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
4'	122.0	183.0	179.5	152.2	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
5'	152.5	198.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
6'	183.0	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
7'	213.5	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
8'	244.0	244.0	239.2	274.5	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9
10'	305.0	274.5	427.0	366.0	475.9	122.0	91.5	183.0	15.3	34.3

Fuente: (Azevedo & Alvarez, 1976)

Paso 3. Determinación de la lámina de agua.

$$h_a = \left(\frac{Q}{C}\right)^{\frac{1}{n}}$$

$$h_a = 204 \text{ mm} = 20,4 \text{ cm}$$

Paso 4. Cálculo de la canaleta en la sección media.

$$W_a = \frac{2}{3}(D - W) + W$$

$$W_a = 16 \text{ cm}$$

Paso 5. Cálculo de la velocidad en la sección media.

$$v_a = \frac{Q}{W_a h_a}$$

$$v_a = 0,316 \frac{m}{s}$$

Paso 6. Cálculo de la energía total disponible: en la sección 1-1

$$E_1 = \frac{v_a^2}{2g} + h_a + N$$

$$E_1 = 25,2 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$$

Paso 7. Cálculo de la velocidad antes del resalto: en la sección 2-2

Aplicando Bernoulli:

$$E_2 = \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

$$v^2 = \frac{Q}{Wh_2}$$

Igualando $E_1=E_2$ (Despreciando pérdidas por fricción entre 1 y 2), tenemos:

$$0,25 \text{ m} = \left(\frac{0,0103 \text{ m}^3/\text{s}}{0,0508 \text{ m} * h_2} \right)^2 * \frac{1}{2 * 9,81 \text{ m}/\text{s}^2} + h_2$$

$$h_2^3 - 0,252 h_2^2 + 0,0020953 = 0$$

Considere que el valor de h_2 se obtiene de resolver una ecuación cúbica que deriva en 3 raíces, la raíz que se debe tomar como valor de h_2 es la raíz media.

Las raíces son:

$$X_1 = 0,20, X_2 = -0,07, X_3 = 0,13$$

$$h_2 = 0,1 \text{ m}$$

Entonces:

$$v^2 = 1,56 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Paso 8. Determinación de la lámina del agua en el resalto.

$$h_b = h_2 - N$$

$$h_b = 0,057 \text{ m}$$

Paso 9. Chequeo del grado de sumergencia (S) para verificar condiciones de aforador.

$$S = \frac{h_b}{h_a}$$

$$S = 0,3$$

$S = 0,3 < 0,5$ Si cumple (Ver Tabla 27).

Tabla 27. Requerimientos de sumergencia.

Ancho de garganta	Máxima sumergencia (H_b/H_a)
2,54 (1") a 5,08 (2")	0,5
7,5 (3") a 22,9 (9")	0,6
30,5 (1') a 244 (8')	0,7
305 (10') a 1525 (50')	0,8

Fuente: Ministerio de Desarrollo Económico, 2000.

Paso 10. Cálculo del número de Froude.

Para la sección 3-3 aplicamos la ecuación del resalto hidráulico

$$\frac{h_3}{h_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 * F_2^2} - 1 \right)$$

$$F_2 = \sqrt{\frac{v_2^2}{h_2 * g}}$$

$$F_2 = 1,4$$

Como $F_2 > 1$, el flujo se considera supercrítico, lo que garantiza un resalto hidráulico que aunque débil permite realizar la mezcla, no obstante para otras aplicaciones se recomienda un Número de Froude entre 1,7 - 2,5 o 4,5 - 9,0 ya que en estos rangos el resalto hidráulico es más fuerte y estable.

Paso 11. Cálculo de la lámina de agua al final del trecho divergente.

$$h_3 = \frac{h_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right)$$

$$h_3 = 0,20 \text{ m}$$

Paso 12. Cálculo de la lámina de agua al final de la canaleta: sección 4-4

$$h_4 = h_3 - (N - K)$$

$$h_4 = 0,18 \text{ m}$$

Paso 13. Cálculo del tiempo medio de mezcla

$$t_d = \frac{G}{v_m}$$

Para el cálculo de la velocidad media, tenemos que:

$$v_m = \frac{v_3 + v_4}{2}$$

$$v_3 = \frac{Q}{W * h_3} = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_4 = \frac{Q}{C * h_4} = 0,43 \frac{m}{s}$$

$$v_m = 0,73 \frac{m}{s}$$

Entonces:

$$t_d = 0,35 s$$

Paso 14. Cálculo del gradiente de velocidad (G_v)

$$G = \sqrt{\frac{\gamma * \Delta h}{\mu * t_d}}$$

Para el cálculo de la pérdida de carga (Δh) aplicamos el principio de Bernoulli:

$$E_1 = E_4 + \Delta h$$

Reemplazando tenemos:

$$\frac{v_a^2}{2g} + h_a + N = \frac{v_4^2}{2g} + h_4 + (N - K) + \Delta h$$

$$\Delta h = 0,046 m$$

Entonces:

$$G_v = 1076 s^{-1}$$

Según la recomendación del RAS 2000 (Ver **Tabla 28**) el gradiente de velocidad debe estar en el intervalo $500 \leq G_v \leq 2000 s^{-1}$, condición que se cumple satisfactoriamente.

Tabla 28. Criterios de diseño para mezcladores rápidos.

Criterio	Tiempo de Retención	Gradiente de velocidad (s^{-1})
AWWA	20	1000
	30	900
	40	790
	>40	700
RAS 2000	≤ 60	500 – 2000

Fuente: Viceministerio de Agua y Saneamiento Básico, 2010.

Paso 15. Cálculo de la distancia de elevación de la cresta por encima del fondo del canal (X).

$$X = h_5 - h_4$$

Para $h_5=0,2$ m, tenemos que:

$$X = 0,027 \text{ m}$$

Paso 16. Longitud de desarrollo del resalto.

$$L = 6 * (h_3 - h_2)$$

$$L = 0,40 \text{ m}$$

3) FLOCULADOR HIDRÁULICO DE PLACAS PARALELAS CON FLUJO HORIZONTAL

Criterios de diseño:

- Gradiente $20 \leq G \leq 60 \text{ s}^{-1}$
- Tiempo de detención $15 \leq t_d \leq 20 \text{ min}$
- Velocidad $0,1 \leq v \leq 0,6 \text{ m/s}$
- Distancia entre tabique (baffle) y canal $= 1,5 * S$

Datos iniciales:

- Caudal de diseño (Q) = $0,0103 \text{ m}^3/\text{s}$
- Tiempo de retención (t_d) = 15 min
- Velocidad en el primer canal (v_1) = $0,13 \text{ m/s}$
- Separación/espacio entre baffles/tabiques/pantallas (S) = $0,25$
- No. De zonas/tramos de floculación (Z) = 3 und.

Dada su disponibilidad y bajo costo los tabiques seleccionados son laminas corrugadas (onduladas) de fibrocemento para las cuales el coeficiente de rugosidad es $n=0,03$. Sus dimensiones son:

Largo (L_{tabique}) = $0,91 \text{ m}$

Ancho (a_{tabique}) = $0,92 \text{ m}$

Grosor (e) = $0,005 \text{ m}$

Cálculo para el primer tramo

Paso 1. Área seccional de flujo (A)

$$A = \frac{Q}{v_1} = 0,08 \text{ m}^2$$

Paso 2. Profundidad del agua (h) y borde libre (h_l)

$$h = \frac{A}{S} = 0,32 \text{ m}$$
$$h_l = L_{\text{tabique}} - h = 0,59 \text{ m}$$

Paso 3. Separación tabique-pared (s) y ancho total del canal (a)

$$s = 1,5 * S = 0,38 \text{ m}$$
$$a = s + a_{\text{tabique}} = 0,38 \text{ m}$$

Paso 4. Longitud de recorrido del agua (L)

$$L = v_1 * \frac{t_d}{Z} = 39 \text{ m}$$

Paso 5. Número de tabiques (N)

$$N = \frac{L}{a} + 1 = 31$$

Paso 6. Perdida de carga total (Δh)

$$\Delta h = N * \frac{3v_1^2}{2 * g} + J * L$$

Donde:

$$v = \frac{1}{n} * R_H^{2/3} * J^{1/2} \text{ (Manning)}$$
$$J = \left[\frac{v_1 * n}{R_H^{2/3}} \right]^2$$

Pero antes,

$$R_H = \frac{A}{2h + S} = 0,09 \text{ m}$$
$$R_H^{2/3} = 0,2 \text{ m}^{2/3}$$

Luego,

$$J = 3,8 * 10^{-4}$$

Entonces:

$$\Delta h = 0,1 \text{ m}$$

Paso 7. Gradiente de velocidad (G_v)

$$G = \frac{\sqrt{\gamma * \Delta h}}{\sqrt{\mu * t_d}}$$

$$G = 59 \text{ s}^{-1}$$

Para este caso se cumple $20 \leq G \leq 60 \text{ s}^{-1}$ satisfactoriamente.

Paso 8. Longitud del canal principal / tramo 1 (L_c)

$$L_c = N * e + (N - 1)S$$

$$L_c = 8 \text{ m}$$

Para los tramos 2 y 3, se asumen las velocidades 0,11 y 0,10 m/s respectivamente.

Se inicia calculando el espaciamiento así:

$$S = \frac{Q}{v_i * h}$$

Siendo v_i la velocidad para cada tramo. Prosiguen los mismos pasos de cálculo del tramo 1, desde el Paso 3 hasta el Paso 8. En la **Tabla 29**, se muestran los resultados obtenidos para cada tramo o canal principal.

Tabla 29. Resultados del cálculo de dimensionamiento del floculador.

Parámetro	Símbolo	Formula	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Unidad
Área seccional de flujo	A	$A = \frac{Q}{v}$	0,08	0,08	0,08	m ²
Profundidad del agua	h	$h = \frac{A}{S}$	0,32	0,32	0,32	m
Espaciamiento entre baffles/tabiques	S	$S = \frac{Q}{v * h}$	0,25	0,30	0,33	m
Ancho total del canal principal/tramo	a	$a = (1,5 * S) + a_{tabique}$	1,30	1,36	1,41	m
Longitud de recorrido del agua	L	$L = v * \frac{t_d}{Z}$	39,00	33,00	30,00	m
Numero de tabiques	N	$N = \frac{L}{a} + 1$	31,00	24,00	21,00	unds.
Perdida de carga total	Δh	$\Delta h = N * \frac{3v_1^2}{2 * g} + J * L$	0,10	0,05	0,04	m
Gradiente de velocidad	G_v	$G = \frac{\sqrt{\gamma * \Delta h}}{\sqrt{\mu * t_d}}$	59,00	45,00	38,00	s ⁻¹
Longitud del canal principal/tramo	L_T	$L_c = N * e + (N - 1)S$	8,00	7,30	7,00	m

Fuente: El Autor.

4) SEDIMENTADOR LAMINAR (DECANTADOR DE ALTA TASA)

Consideraciones generales

- El parámetro de diseño más importante es la velocidad de sedimentación de los flóculos, que depende fundamentalmente de las características del agua cruda y de la eficiencia del pretratamiento. Por esta razón, se recomienda, la determinación experimental de la velocidad de sedimentación para cada caso. No obstante, en ausencia de un ensayo de sedimentación, se adoptan especificaciones de tipo general para los valores de diseño, así:

Para flóculos de sulfato de aluminio la velocidad de sedimentación varía entre 0.015 y 0.070 cm/s. Equivalente a 13 y 60 m³/m²d respectivamente⁶. En Colombia es muy utilizado entre 24 y 30 m³/m²d. En otros países como Brasil se emplea como valor promedio 40 m³/m²d.

- De acuerdo con investigaciones realizadas en prototipos, las unidades se pueden diseñar con Nr de hasta 500, sin que se obtengan disminuciones apreciables en la eficiencia alcanzada⁷. Sin embargo, se recomienda trabajar con Nr<250.
- La velocidad longitudinal media (Vo) en los elementos tubulares comúnmente se adopta entre 10 y 25 cm/min. En cada caso, es posible determinar la velocidad máxima del flujo mediante la expresión:

$$V_o \text{ máx.} = [Nr / 8]^{0,5} * V_{sc}$$

Donde Vsc = velocidad de sedimentación de las partículas.

- Dada la gran cantidad de módulos que se precisan, es deseable que el material sea de bajo costo y muy resistente a la permanencia bajo el agua. Los materiales que se usan para este fin son las lonas de vinilo reforzadas con poliéster, el asbesto-cemento, el plástico y la fibra de vidrio.
- Para optimizar el funcionamiento de estas unidades, debemos considerar en el proyecto estructuras de entrada, salida, almacenamiento y extracción de lodos correctamente concebidos, a través de las cuales se debe vehiculizar el agua para lograr el mejor comportamiento y la máxima eficiencia de la unidad.

⁶ Pérez, Jorge. Tratamiento de aguas. Colombia, UNAL-Facultad de Minas.

⁷ Richter, Carlos. Decantación. Curitiba, SANEPAR, 1986.

A) ZONA DE ENTRADA.

En un floculador el gradiente de velocidad que tiene el agua puede estar comprendido entre 10 y 100 s⁻¹, en cambio en un sedimentador el agua tiene un gradiente cercano a 1 s⁻¹. Esto implica que no es fácil hacer pasar agua de un floculador a un sedimentador sin que se produzcan grandes perturbaciones en las líneas de flujo.

Por lo tanto el propósito de dicha estructura es:

- Distribuir el efluente del floculador uniformemente en el área transversal del sedimentador.
- Evitar hasta donde sea posible los chorros de agua que crean corrientes rotacionales y otras fuerzas cinéticas.
- Disipar la energía que trae el agua.
- Evitar altas velocidades que puedan arrastrar (resuspender) los lodos ya depositados.

Es conveniente entonces que el gradiente instantáneo sea menor a 15 s⁻¹, a través de cada orificio.

Los dos dispositivos de entrada más utilizados son:

- Canal con orificios de fondo.
- Pantalla perforada.

Cálculo del canal con orificios en el fondo

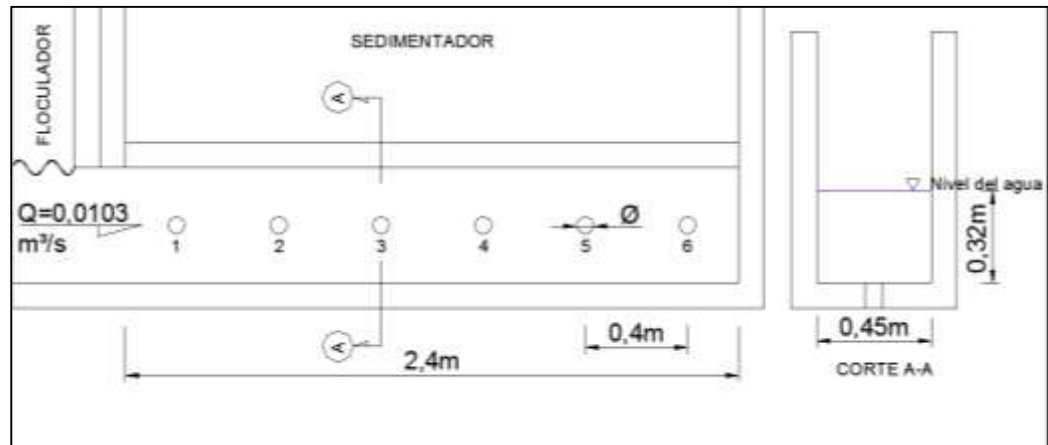
El problema se resuelve por tanteo y error suponiendo unas dimensiones del canal (Ver Figura 23) y encontrando el área de los orificios (todos iguales), conservando los caudales a través de los mismos dentro del grado de precisión adoptado.

Temperatura del agua (°T)=30	°C	
Peso específico (γ)	=997	kN/m ³
Viscosidad cinemática (μ)	=8,03x10 ⁻⁷	m ² /s
Caudal de diseño (Q)	=0,0103	m ³ /s
Rugosidad del concreto (n)	=0,013	

$$\text{Precisión (\%)} = 95 \rightarrow m = 0,95 \rightarrow q_4/q_1 = 0,95$$

$$\Delta h/h_1 = 1 - m^2 = 0,098$$

Figura 23. Dimensiones de la canal con orificios en el fondo.



Fuente: El Autor.

Paso 1. Cálculo del caudal para cada orificio.

Se supone flujo uniforme y caudal igual por cada orificio, esto es:

$$q_i = \frac{Q}{\text{No. orificios}}$$

$$q_i = 0,0017 \frac{m^3}{s}$$

Paso 2. Cálculo del flujo entre el orificio 1 y 2.

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} * s^{1/2} \quad (\text{Manning})$$

Donde:

$$s = \frac{v^2 * n^2}{R^{4/3}}$$

Pero,

$$v = \frac{Q - q_i}{b * H} = \frac{5q_i}{A}$$

$$v = 0,0596 \frac{m}{s}$$

$$R = \frac{b * H}{2b + H}$$

$$R = 0,118 \, m$$

Entonces:

$$s = 1 * 10^{-5}$$

Paso 3. Cálculo del flujo entre el orificio 2 y 3.

$$v = \frac{Q - 2q_i}{b * H} = \frac{4q_i}{A}$$

$$v = 0,0477 \frac{m}{s}$$

Entonces:

$$s = 6,6 * 10^{-6}$$

Paso 4. Cálculo del flujo entre el orificio 3 y 4.

$$v = \frac{Q - 3q_i}{b * H} = \frac{3q_i}{A}$$

$$v = 0,0358 \frac{m}{s}$$

Entonces:

$$s = 3,7 * 10^{-6}$$

Paso 5. Cálculo del flujo entre el orificio 4 y 5.

$$v = \frac{Q - 4q_i}{b * H} = \frac{2q_i}{A}$$

$$v = 0,0238 \frac{m}{s}$$

Entonces:

$$s = 1,7 * 10^{-6}$$

Paso 6. Cálculo del flujo entre el orificio 5 y 6.

$$v = \frac{Q - 5q_i}{b * H} = \frac{q_i}{A}$$

$$v = 0,0119 \frac{m}{s}$$

Entonces:

$$s = 4,1 * 10^{-7}$$

Paso 7. Perdida de carga a lo largo del canal (Δh)

$$\Delta h = \sum s * d$$

$$\Delta h = 9,1 * 10^{-6} m$$

Paso 8. Perdida de carga en cada orificio (h)

Sabiendo que:

$$\frac{\Delta h}{h} = 1 - m^2$$

Entonces:

$$h = \frac{\Delta h}{1 - m^2}$$
$$h = 9,36 * 10^{-5} m$$

Paso 9. Área de cada orificio (a_o)

Sabiendo que:

$$q_i = C * a_o \sqrt{2gh}$$

Entonces:

$$a_o = \frac{q_i}{C * \sqrt{2gh}}$$
$$a_o = 0,06 m^2$$

Paso 10. Cálculo del gradiente de velocidad (G_v)

$$G_v = n \sqrt{\frac{\gamma}{\mu}} R_H^{-0,67} v^{3/2}$$

Supongamos orificios circulares iguales.

$$R_H = \frac{D}{4}$$

Donde:

$$D = \sqrt{\frac{4a_o}{\pi}}$$
$$D = 0,27 m$$

Entonces:

$$R_H = 0,07 m$$

Ahora,

$$v = \frac{q_i}{a_o}$$
$$v = 0,03 \frac{m}{s}$$

Entonces:

$$G_v = 14 s^{-1}$$

Para este caso $G_v \leq 15 s^{-1}$ se cumple satisfactoriamente.

Cálculo de la pantalla perforada o difusora

Debe cumplir los siguientes requisitos:

- La velocidad a través de los orificios debe ser menor o igual a 0,15 m/s.
- Debe hacerse un gran número de orificios pequeños en lugar de pocos orificios grandes.
- La forma ideal de los orificios es circular, luego cuadrada.
- Los orificios más bajos deben quedar H/4 o H/5 por encima del fondo.
- Los orificios más altos deben quedar H/5 o H/6 por debajo de la superficie del agua.
- La pantalla perforada (o difusora) debe quedar mínimo a 0,7 m de la pared frontal del sedimentador o de la pared interior del canal con orificios para realizar limpieza.

Datos iniciales:

Velocidad a través de los orificios (v) = 0,1 m/s
Diámetro de los orificios (d_o) = 1½ in
Altura total de la pantalla (h) = 0,8 m
Ancho total de la pantalla (b) = 2,4 m

Paso 1. Área de todos los orificios (A_o).

$$A_o = \frac{Q}{v}$$
$$A_o = 0,103 \text{ m}^2$$

Paso 2. Área de cada orificio (A_o).

$$a_o = \frac{d_o^2 \pi}{4}$$
$$a_o = 0,00114 \text{ m}^2$$

Paso 3. Número de orificios (N).

$$N = \frac{A_o}{a_o}$$
$$N = 90 \text{ unds.}$$

Paso 4. Porción de altura de la pantalla con orificios (h_o).

$$h_o = h - \frac{2}{5} h$$

Paso 5. Porción del ancho de la pantalla con orificios (b_o).

$$b_o = b - 0,06b$$

$$b_o = 2,26 \text{ m}$$

Paso 5. Se asume el número de filas (N_f) y columnas (N_c).

$$N_f = 5 ; N_c = 18$$

Paso 6. Espaciamiento entre filas (S_f) y columnas (S_c).

$$S_f = \frac{h_o}{N_f - 1} ; S_c = \frac{b_o}{N_c - 1}$$

$$S_f = 0,12 \text{ m} ; S_c = 0,13 \text{ m}$$

B) ZONA DE SEDIMENTACIÓN

La acción del sedimentador depende del área superficial y no de su profundidad, razón por la cual una subdivisión horizontal de la zona de sedimentación produciría una superficie doble para recibir sedimentos, así múltiples subdivisiones, multiplicarían dicha capacidad (Hazen 1909). El principal problema de ello es la remoción de los lodos sedimentados, razón por la cual se recomienda usar subdivisiones de al menos 60° de inclinación para facilitar su remoción.

Para las subdivisiones se usan comúnmente placas planas de fibrocemento, también pueden emplearse tubos circulares, tubos cuadrados, tubos hexagonales o láminas onduladas paralelas debidamente colocadas en el tanque, de tal forma que el agua ascienda por dentro de la celda con flujo laminar, esto es, $N_R < 250$.

Cálculo de la zona de sedimentación

Datos iniciales:

○ Caudal de diseño (Q)	0,0103	m ³ /s
○ Velocidad de sedimentación (v_s)	0,00015	m/s
○ Viscosidad cinemática del agua	$8,03 \times 10^{-7}$	m ² /s
○ Separación de las placas (e_p)	10	cm
○ Espesor de las placas (e)	0,5	cm
○ Angulo de inclinación de las placas(θ)	60°	(grados)
○ Longitud del módulo de placas (l)	122	cm
○ Módulo de las placas (S)	1	(fibrocemento)
○ Ancho total zona de sedimentación (a)	240	cm

Paso 1. Espaciamiento de las placas (d)

$$d = e_p \sin(\theta) - e$$

$$d = 8,2 \text{ cm}$$

Paso 2. Longitud útil dentro de las placas (l_u)

$$l_u = l - 10 \cos(\theta)$$

$$l_u = 117 \text{ cm}$$

Paso 3. Longitud relativa del módulo de placas (L)

$$L = \frac{l_u}{d}$$

$$L = 14$$

Paso 4. Área superficial de la unidad (A_s)

$$A_s = \frac{Q}{f * v_s}$$

Donde:

$$f = \frac{\sin(\theta) * [\sin(\theta) + L \cos(\theta)]}{S}$$

$$f = 6,96$$

Entonces:

$$A_s = 9,9 \text{ m}^2$$

Paso 5. Número de canales formados por las placas (N)

$$N = \frac{A_s * \sin(\theta)}{a * d}$$

$$N = 44$$

Paso 6. Longitud total de la zona de sedimentación (L_T)

$$L_T = l \cos(\theta) + \frac{N * d + (N + 1) * e}{\sin(\theta)}$$

$$L_T = 5 \text{ m}$$

Paso 7. Carga superficial (C_s)

$$C_s = \frac{Q}{a * L_T}$$

$$C_s = 17 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ d}$$

Paso 8. Velocidad de flujo (v_o)

$$v_o = \frac{Q}{A_s \sin(\theta)}$$

$$v_o = 0,121 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

Paso 9. Radio hidráulico del módulo de placas (R_H)

$$R_H = \frac{a * d}{2 * (a + d)}$$

$$R_H = 0,04 \text{ m}$$

Paso 10. Número de Reynolds (N_R)

$$N_R = \frac{4R_H * v_o}{\mu}$$

$$N_R = 237$$

El valor de N_R para flujo laminar se cumple satisfactoriamente ya que $N_R \leq 250$.

Paso 11. Velocidad longitudinal máxima (v_o máx.)

$$v_o \text{ máx.} = \frac{(N_R/8)^{1/2}}{v_s}$$

$$v_o \text{ máx.} = 0,03 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

La condición $v_o \text{ máx.} \leq 0,05 \text{ cm/s}$ se cumple satisfactoriamente.

Paso 12. Tiempo de retención (t_d)

$$t_d = \frac{l}{v_o}$$

$$t_d = 1012 \text{ s} = 17 \text{ min}$$

Paso 13. Eficiencia (η)

$$\eta = 1 - \frac{v_s}{v_o} * 100$$

$$\eta = 88\%$$

C) ZONA DE SALIDA

El agua puede ser retirada del sedimentador por medio de vertederos o canaletas que al mismo tiempo fijan el nivel del agua en el mismo. La longitud del vertedero debe ser tal, que la carga unitaria esté comprendida entre:

- 1,67 a 2,50 L/s por metro de vertedero si el “floc” es liviano.
- 2,50 a 3,30 L/s por metro de vertedero si el “floc” es pesado.

Si la carga unitaria es mayor, puede causar perturbaciones que resuspenden los “flocs” ya depositados en la zona de lodos ya que aumenta la componente vertical de la velocidad de flujo hasta valores mayores de v_s .

El objeto del vertedero es recolectar el agua a todo lo ancho del sedimentador. No puede funcionar ahogado. Si funciona libre, se garantiza que la carga sobre el vertedero es constante y el agua sale uniformemente.

Cuando la longitud necesaria de vertedero no cabe en el ancho del sedimentador deben ponerse canaletas para aumentar dicha longitud.

Una forma de uniformizar la recolección del agua sedimentada se consigue colocando una lámina metálica graduable, en forma de sierra, en las canaletas.

Cálculo de canaletas de recolección

Datos iniciales:

Caudal de diseño (Q)	=10,3 L/s
Tasa de diseño x metro lineal (q)	=1,1 L/s*m
Ancho zona de sedimentación (B)	=2,4 m

Paso 1. Longitud de la canaleta (L)

$$L = \frac{Q}{q}$$

$$L = 9,4 \text{ m}$$

Paso 2. Número de canales (N)

$$N = \frac{L}{B}$$

$$N = 4$$

Paso 3. Altura máxima de la lámina de agua.

$$h_{m\acute{a}x} = \left(\frac{73Q}{b} \right)^{2/3}$$

Se asume un ancho de canaleta (b) de 30 cm. Entonces:

$$h_{m\acute{a}x} = 8,6 \text{ m}$$

D) ZONA DE LODOS

La cantidad de lodos depositados varía directamente con la cantidad de coagulante utilizado.

Proyectar la cantidad de lodos es muy difícil porque las condiciones del agua no se pueden prever y con ellas varían también las características de los lodos.

Normalmente los flóculos frescos tienen densidades de 1,02 a 1,05 g/cm³ con un contenido de humedad del 95% al 98%, los cuales sufren un proceso de contracción cuando esta sedimentados.

Los lodos no se deben almacenar por mucho tiempo porque:

- Se compactan y es muy difícil removerlos de la tolva.
- Se descomponen produciendo gases que hacen flotar los propios lodos.

Para su dimensionamiento se debe dejar para depósito de lodos un 20% adicional sobre el volumen de la zona de sedimentación.

Cálculo del sistema de drenado de lodos

El drenaje de lodos se efectúa por medio de una tubería cuyo diámetro se calcula mediante la expresión:

$$S = \frac{A}{4850t} h^{1/2}$$

Donde:

S= Sección de la tubería (m)

A= Área superficial de la zona de sedimentación (m²)

H= Profundidad del sedimentador (m)

t = Tiempo de vaciado (horas)

RECOMENDACIONES

La evaluación técnica económica de los sistemas de bombeo requiere la determinación del equilibrio hidráulico mediante medición de las presiones en líneas de succión e impulsión con la ayuda de manómetros, esto con el fin de corregir las imprecisiones que pueden presentarse en el desarrollo del cálculo mediante método de hipótesis.

El diseño óptimo de los sistemas de bombeo es una tarea previa a su implementación, razón por la cual debe contemplarse su proyección en la planeación general de la mina a corto, mediano y largo plazo, de esta manera puede garantizarse el presupuesto suficiente para mantener la operación optima del mismo.

Los análisis de laboratorio para determinar la calidad del agua debe ser contratado con laboratorios certificados por el IDEAM y el método usado para la determinación de cada parámetro debe corresponder a lo estipulado en el Dec. 3930 del 25 de Octubre de 2010 y la Res. 0631 del 17 Marzo de 2015.

La adopción de la tecnología adecuada para el desarrollo de proyectos para el tratamiento de aguas debe tener como base un previo estudio de tratabilidad que permita tomar la decisión acertada y a su vez determinar cada uno de los aspectos que intervienen en el dimensionamiento final del sistema escogido.

Para la ejecución o puesta en marcha del presente proyecto, en especial para la construcción de la planta de tratamiento de agua propuesta, se requiere de especialistas en el área ambiental o de saneamiento básico dada la complejidad constructiva de ésta.

CONCLUSIONES

El origen de las aguas en la mina se debe a la infiltración de un porcentaje de aguas precipitadas o de escorrentía, consecuencia directa del fracturamiento intensivo de diferentes unidades litológicas en la zona, otra parte proviene de acuíferos subterráneos, los cuales son expuestos por las labores mineras, razón por la cual se evidencia caída de agua desde el techo y brotes de agua en el piso de dichas labores.

Las bajas eficiencias reportadas en el sistema de bombeo obedecen especialmente a tres razones fundamentales: en primer lugar a problemas de diseño dado que el diámetro de la tubería seleccionada no es el óptimo; en segundo lugar a la falta de planeación y la ausencia del mantenimiento preventivo, dado que revisiones periódicas permitirían anticipar fallos en el sistema y prever inversiones para la sustitución de piezas, equipos y tubería, desgastada o que hayan cumplido con su tiempo de servicio; por último a condiciones operacionales como por ejemplo la instalación de los equipos de bombeo, entendiéndose por ello su disposición, alineamiento, acoplamiento, etc. Además del mal uso por parte del operario quien no cuenta con la instrucción clara y precisa del funcionamiento y uso adecuado de estos equipos.

Teóricamente se logró la optimización del sistema de bombeo elevando su eficiencia promedio de 17 % a un 53 %, lo que se traduce en el ahorro anual de \$ 112.499.392,80 en costos de operación, esto, contemplando una mínima inversión de \$ 122.144.257,62. Conservando además dentro del sistema la mitad de los equipos de bombeo empleados actualmente.

El análisis económico del sistema propuesto determinó que la inversión es recuperable en un plazo no mayor a 5 años; al término de los cuales la tasa interna de retorno será del 11% lo que viabiliza la inversión al mediano y largo plazo.

Con el diseño de la planta de tratamiento de filtración rápida se garantiza el manejo adecuado de las aguas de mina permitiendo fundamentar la solicitud del permiso de vertimientos líquidos puntuales a cuerpos de agua superficiales ante la CAR.

BIBLIOGRAFIA

MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos, Sexta edición. México: Pearson Educación, 2006. 644 p. ISBN: 970-26-0805-8.

SALDARRIAGA, Juan G. Hidráulica de tuberías. Colombia: McGraw-Hill, 2001. ISBN: 958-600-831-2.

ORTIZ VIDAL, Luis E. *et al.* Equilibrio hidráulico en sistemas de bombeo minero: estudio de caso. En: Ingeniare. Revista chilena de Ingeniería. Vol. 18. No. 3 (2010). [en línea] www.scielo.cl/pdf/ingeniare/art07 [citado en 5 septiembre de 2015].

SOTELO AVILA, Gilberto. Hidráulica general. México: Editorial Limusa SA, 1974. 547 p.

AZEVEDO, Netto. Manual de hidráulica, sexta edición. México: Editorial Harla. 549 p.

KARASSIK, Igor *et al.* Manual de Bombas. México: Editorial McGraw-Hill, 1983. 1300 p. ISBN 9789684512740.

KENNETH, J. *et al.* Bombas: Selección, uso y mantenimiento. México: Editorial McGraw-Hill, 1992.

MURILLO, Isis. MONTOYA, Juan. Evaluación técnico económica y rediseño del sistema de bombeo de una mina de carbón. Medellín, 1994. 187 p. Trabajo de grado (Ingeniero civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

NEW YORK STATE DEPARTMENT OF HEALTH. Manual de tratamiento de aguas. México: Editorial Limusa SA, 2004. 205 p. ISBN 968-18-0463-5.

PEREZ PARRA, Jorge A. Manual de potabilización de agua. Medellín, 1990. 502 p. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

CANEPA DE VARGAS, Lidia *et al.* Manual I: Teoría, tomo 1. En: Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Lima, 2004. 306 p. CEPIS.

CANEPA DE VARGAS, Lidia *et al.* Manual I: Teoría, tomo 2. En: Tratamiento de agua para consumo humano: Plantas de filtración rápida. Lima, 2004. 306 p. CEPIS.

SILVA GARAVITO, Luis F. Diseño de plantas de purificación de aguas. Bogotá, 1973. 157 p. Universidad Pontificia Javeriana.

CEPIS. Tomo I: Criterios de diseño para la dosificación y mezcla rápida. En: Manual V: Criterios de diseño. 1992. [en línea] <www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/027757/027757.htm [citado en 15 de abril de 2016].

CEPIS. Tomo II. Criterios de diseño para floculadores y decantadores. En: Manual V: Criterios de diseño. 1992. [en línea] <www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/027757/027757.htm [citado en 15 de abril de 2016].

CEPIS. Tomo III. Criterio de diseño para filtros. En: Manual V: Criterios de diseño. 1992. [en línea] <www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan/027757/027757.htm [citado en 15 de abril de 2016].

GLOSARIO

Cavitación. Es un fenómeno físico que aparece en los sistemas de bombeo debido a cambios bruscos de presión que forman cavidades llenas de vapor o de gas en el líquido, subsecuentemente estas burbujas implosionan causando daños severos en impulsores y tuberías.

Clarificación. La clarificación es un proceso para mejorar la calidad del agua y tiene por objeto retirar los sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas más grandes que se pueden remover con mayor facilidad, se incluyen los subprocesos de coagulación, floculación y sedimentación.

Coagulación. Es el proceso de formación de pequeñas partículas gelatinosas mediante la adición de un coagulante al agua y la aplicación de energía de mezclado, que desestabiliza las partículas suspendidas por neutralización de las cargas de coloides cargados negativamente.

Floculación. Es el proceso mediante el cual se juntan las partículas desestabilizadas o coaguladas para formar un aglomerado más grande llamado flóculo y se debe a un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos.

Floc o floculo. Acumulación de sólidos en suspensión que se han unido para formar grupos o pequeñas masas gelatinosas.

NPSH. Net Positive Suction Head o Altura Neta Positiva de Aspiración es la energía de presión requerida para evitar la cavitación.

NSPHa. Es el nivel de energía que debe proveer el sistema para evitar, también, la formación de burbujas de vapor, y corresponde según el diseño del sistema.

NSPHr. Es el nivel mínimo de energía requerida para evitar la formación de burbujas de vapor y es un valor que corresponde según en diseño del fabricante.

Potencia teórica (P). Conocida también como potencia hidráulica, es aquella que se requiere si la carga deseada (H_T) y la capacidad deseada Q , pudieran producirse sin ninguna pérdida.

Potencia al freno (BHP). También denominada potencia demandada por la bomba (P_b), es la potencia requerida en el eje de la bomba para moverla. Esta potencia tiene en cuenta la potencia consumida por pérdidas hidráulica, mecánica y volumétrica.

Potencia del sistema (P_s). Es la potencia que se debe suministrar al conjunto motor-bomba a una determinada carga (HT) y capacidad (Q); es pues la potencia eléctrica suministrada al motor para accionar la bomba, también llamada potencia consumida por el sistema.

Planta de tratamiento. Una planta de tratamiento es una secuencia de operaciones o procesos unitarios, convenientemente seleccionados con el fin de remover totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables estipulados por las normas.

Planta de filtración rápida. Estas plantas se denominan así porque los filtros que las integran operan con velocidades altas, entre 80 y 300 m³/m².d, de acuerdo con las características del agua, del medio filtrante y de los recursos disponibles para operar y mantener estas instalaciones.

Planta de filtración lenta. Los filtros lentos operan con tasas que normalmente varían entre 0,10 y 0,30 m/h; esto es, con tasas como 100 veces menores que las tasas promedio empleadas en los filtros rápidos; de allí el nombre que tienen. También se les conoce como filtros ingleses, por su lugar de origen.

VLMP. El valor límite máximo permisible, hace referencia a los valores numéricos que toma cada uno de los parámetros que determinan la calidad del agua y que por norma no pueden superarse.

ANEXOS